



TUGAS AKHIR - TM 141585

**PENGARUH JUMLAH MAGNET PERMANEN  
DAN *AIR GAP* TERHADAP TORSI MAKSIMUM  
*AXIAL EXTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR***

AKBAR ROBBI CAHYANA

NRP 02111340000090

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**PENGARUH JUMLAH MAGNET PERMANEN  
DAN AIR GAP TERHADAP TORSI MAKSIMUM  
*AXIAL EXTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR***

**AKBAR ROBBI CAHYANA**

**NRP 02111340000090**

**Dosen Pembimbing**

**Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018**





**FINAL PROJECT - TM 141585**

# **INFLUENCES OF THE AMOUNT OF PERMANENT MAGNET AND AIR GAP TO MAXIMUM TORQUE OF AXIAL EXTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR**

**AKBAR ROBBI CAHYANA**

**NRP 02111340000090**

**Advisor**

**Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**

**Faculty of Industrial Technology**

**Sepuluh Nopember Institute of Technology**

**Surabaya 2018**



**PENGARUH JUMLAH MAGNET PERMANEN DAN  
AIR GAP TERHADAP TORSI MAKSIMUM AXIAL  
EXTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**AKBAR ROBBI CAHYANA**

NRP. 2111340000090

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Agus Sigit Pramono, DEA  
NIP. 196508101991021001 (Pembimbing)
2. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E  
NIP. 196511031990021001 (Penguji I)
3. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT  
NIP. 196807061999031004 (Penguji II)
4. Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD.  
NIP. 197909262005011001 (Penguji III)

**SURABAYA**

**JULI, 2018**





# **PENGARUH JUMLAH MAGNET PERMANEN DAN AIR GAP TERHADAP TORSI MAKSIMUM AXIAL EXTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR**

**Nama Mahasiswa** : Akbar Robbi Cahyana  
**NRP** : 02111340000090  
**Pembimbing** : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

## **ABSTRAK**

*Magnetic gear* merupakan inovasi untuk mengatasi permasalahan pada roda gigi. Tidak adanya kontak antar *gear* menyebabkan *magnetic gear* memiliki beberapa keunggulan yaitu, tidak memerlukan pelumasan, panas yang timbul kecil, dan umur dari *gear* bertambah panjang. Model *axial external magnetic spur gear* memiliki keuntungan yaitu fluks magnet yang lebih besar dibandingkan dengan model *radial* sehingga dapat meningkatkan torsi maksimumnya. Namun, permasalahan yang berkaitan dengan *torque density* dari *axial external magnetic spur gear* belum teratasi dengan baik. Oleh karena itu, perlu dilakukan observasi pengaruh dari jumlah magnet permanen yang digunakan dan juga pengaruh dari besarnya jarak *air gap* pada *axial external magnetic spur gear*.

Analisa yang dilakukan meliputi pemodelan, proses simulasi, parameter yang diukur, dan variasi-variasi yang diberikan. Pembuatan model 3D *axial magnetic spur gear* dilakukan menggunakan bantuan *software* SolidWork dengan geometri sama seperti *ground spur gear* MSGA1.5-24 dan MSGA1.5-48 dari Kohara Industry Co., Ltd. Pemodelan tersebut diinterpretasikan dalam *software* Ansys Maxwell 3D untuk dilakukan simulasi. Simulasi dilakukan dengan tiga variasi jumlah magnet permanen serta empat

variasi *air gap*. Pertama-tama dilakukan simulasi *magnetostatic* dengan *meshing* berbentuk *tetrahedral*. Pada simulasi *magnetostatic*, berfungsi untuk menganalisa panjang *mesh* yang ditentukan apakah telah mencapai kriteria konvergen. Ketika telah tercapai kriteria konvergen, simulasi dilanjutkan dengan simulasi *transient* untuk mencari besar torsi maksimumnya. Pada simulasi *transient*, HS rotor berputar dengan kecepatan sudut 100 rpm dengan parameter yang ingin ditampilkan berupa torsi pada *high speed* rotor dan *low speed* rotor. Dalam proses simulasi perlu dilakukan pengaturan untuk mengatur lama pengambilan data dan *timeframe* pengambilan data, dengan kondisi batas yaitu kecepatan sudut dan jari-jari kedua rotor tetap.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa pengaruh jumlah magnet permanen terhadap torsi yaitu berbanding terbalik yang berarti bahwa bertambahnya magnet permanen yang digunakan maka semakin kecil torsi yang dapat disalurkan. Begitu pula pengaruh jarak *air gap* terhadap torsi yaitu berbanding terbalik yang berarti bahwa seiring dengan bertambahnya *air gap* maka semakin kecil torsi yang dapat disalurkan.

**Kata kunci:** *Axial external magnetic spur gear, torsi, air gap, magnetic field, flux density*

# **INFLUENCES OF THE AMOUNT OF PERMANENT MAGNET AND AIR GAP TO MAXIMUM TORQUE OF AXIAL EXTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR**

**Nama Student : Akbar Robbi Cahyana**  
**ID Student : 02111340000090**  
**Supervisor : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

## **ABSTRACT**

Magnetic gear is the innovation of gear which is handled the mechanical gear problem. No contact between gear causes magnetic gear has some advantages, i.e. no need lubricants, only small amount of heat founded, and gear could live longer. Axial external magnetic spur gear model has an advantage. It has bigger flux magnet than radial model, for that reason, it can increase the maximum limit of it's torque. However, the problem of torque density-related from axial external magnetic spur gear has not been resolved properly. For that reason, it should to observe the influence how many the amount of permanent magnet and the influence of air gap in axial external magnetic spur gear.

Steps that need to done are modelling, simulation process, parameter measurement, and variations need to be given. The 3D model of axial magnetic spur gear is created using SolidWorks software with identical geometry as MSGA1.5-24 and MSGA1.5-48 ground spur gear from Kohara Industry Co., Ltd. The model will be interpreted in Ansys Maxwell 3D software for simulation. This simulation will observe three variation of the amount of permanent magnet and four variation of air gap. First, the research is started from magnetostatic simulation with tetrahedral shape meshing. Magnetostatic simulation is to analyze the specified

mesh length whether it has reached convergen criteria. When it has gone into convergen criteria, the simulation is continued with a transient simulation to find the maximum torque. In this transient simulation, HS rotor has rotated with angular velocity 100 rpm, so the parameter that want to displayed are the torque at HS rotor and LS rotor. In the simulation process need to set how long to take the data and the timeframe.

Based on the research that has been done, the impact of the amount of permanen magnet on torque is inversely proportional, means increasing amount of the magnet permanent used then the smaller torque can be delivered, likewise the influence of air gap towards torque. That is inversely propotional, means the bigger amount of air gap, then smaller the torque can be delivered.

**Keywords: Axial external magnetic spur gear, torque, air gap, magnetic field, flux density**

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil'alamin. Puji syukur penulis panjatkan kehadirat ALLAH SWT atas limpahan rahmat, hidayah, rizki dan izin-Nya sehingga penyusunan laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penyusunan laporan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademis untuk kelulusan mahasiswa Program Studi S1 Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Gatot Endra Supriyadi dan Ibu Dewi Saptorini selaku orangtua penulis, Fahrul Jainudin selaku kakak penulis, dan keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan do'a yang tak henti-henti hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir Agus Sigit Pramono, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan dan nasehat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T,M T, selaku dosen wali.
4. Tim seperjuangan tugas akhir, Achmad Gafar, M. Fajar Putra Utomo, Doni, Wawan, terima kasih atas kerjasamanya yang diberikan selama ini.
5. Hairul Wasik, Saka Sarwedinata, Hafizh N. Pahlevi, terima kasih telah menjadi partner survival di Surabaya semenjak maba.
6. Teman-teman HIMASA (Himpunan Mahasiswa Surabaya Asal Jember) dan SMASA Jember khususnya Rosa Aprilia Firmandani yang selalu memotivasi penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.

7. Alham A.K. Mahanggi, Arif Fadhullah, M. Iqbal S. Abiyan, dan Achmad Achsin Fathoni S. yang turut membantu dan selalu memberikan dukungan kepada penulis.
8. Seluruh rekan-rekan Laboratorium Mekanika Benda padat yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
9. Seluruh rekan-rekan Teknik Mesin ITS 2013 M56 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Intitut Teknologi Sepuluh Nopember yang turut membantu dan memberikan dukungan kepada penulis.
10. Seluruh Keluarga Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS khususnya mantan pengurus LBMM 2013 yang tak henti-hentinya memberikan semangat kepada penulis.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu satu

Semoga amal dan jasa yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat imbalan dari ALLAH SWT.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan laporan tugas akhir ini. Dan penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan TERIMA KASIH.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Rumusan Masalah .....	5
1.3    Tujuan Masalah .....	5
1.4    Batasan Masalah.....	5
1.5    Manfaat Penulisan .....	6
1.6    Sistematika Penulisan .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>9</b>
2.1    Roda Gigi .....	9
2.1.1    Roda Gigi Lurus ( <i>Spur Gear</i> ) .....	10
2.2    Magnetic Gear .....	10
2.2.1    Torque Density .....	12
2.2.2    Effisiensi.....	15
2.2.3    Hubungan antara Jumlah Magnet terhadap Rasio Putaran	15
2.2.4    Perhitungan <i>Magnetitation</i> Paralel.....	16
2.2.5    Perhitungan <i>Drive Magnet Surface Current Density</i>	16
2.2.6    Pehitungan <i>External Flux Density Field</i> .....	17

2.2.7	Perhitungan Torsi .....	18
2.3	Magnet Permanen.....	21
2.3.1	Demagnetisasi.....	24
2.3.2	Neodymium Magnet (NdFeB) .....	24
2.4	Penelitian Terdahulu.....	27
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>35</b>
3.1	Flowchart Penelitian .....	35
3.1.1	Observasi .....	37
3.1.2	Perumusan Masalah .....	37
3.1.3	Studi Literatur.....	37
3.1.4	Penentuan Data Awal .....	37
3.1.5	Desain 3D dan Simulasi.....	38
3.1.6	Analisa Hasil Data dan Kesimpulan .....	39
3.1.7	Penulisan Laporan .....	39
3.2	Pemodelan dan Simulasi.....	39
3.2.1	Flowchart Simulasi .....	39
3.2.2	Pemodelan 3D dengan SolidWork.....	41
3.2.3	Simulasi .....	43
3.2.4	<i>Post-processing</i> .....	49
3.2.5	Pengambilan dan Pengolahan Data.....	50
<b>BAB IV DATA ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>53</b>
4.1	Analisis Data Simulasi.....	53
4.2	Analisis dan Pembahasan Torsi Hasil Simulasi .....	54
4.2.1	Analisis Pengaruh Besar <i>Air Gap</i> Terhadap Torsi HS Rotor. ....	54
4.2.2	Analisis Pengaruh Besar <i>Air Gap</i> Terhadap Torsi	



LS Rotor .....	58
4.2.3 Analisis Pengaruh Jumlah Magnet Permanen terhadap Torsi HS Rotor.....	62
4.2.4 Analisis Pengaruh Jumlah Magnet Permanen terhadap Torsi LS Rotor .....	63
4.2.5 Perbandingan Torsi <i>Magnetic Gear</i> dan <i>Mechanical Gear</i> .....	65
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>67</b>
5.1 Kesimpulan.....	67
5.2 Saran.....	68
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>xvii</b>
<b>LAMPIRAN 1.....</b>	<b>xix</b>

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Contoh-contoh bentuk kegagalan pada roda gigi .....	3
Gambar 1.2 (a) <i>Radial external magnetic spur gear</i> (b) <i>Axial external magnetic spur gear</i> .....	4
Gambar 2.1 Macam-macam jenis roda gigi.....	9
Gambar 2.2 Geometri roda gigi lurus ( <i>spur gear</i> ) .....	10
Gambar 2.3 Riset pada <i>magnetic gear</i> .....	11
Gambar 2.4 Magnetic gear dan diagram torsi.....	12
Gambar 2.5 Ilustrasi perhitungan volume $V_t$ suatu gearbox.....	14
Gambar 2.6 <i>External magnetic spur gear</i> .....	16
Gambar 2.7 Ilustrasi perhitungan torsi .....	18
Gambar 2.8 (a) Tipikal kurva histerisis <i>soft</i> dan <i>hard</i> ferromagnetik & (b) <i>Energy product</i> (BHmax). ....	23
Gambar 2.9 Magnet <i>neodymium</i> .....	26
Gambar 2.10 <i>Permanent magnet spur gear</i> .....	28
Gambar 2.11 <i>Inner type magnetic spur gear</i> .....	28
Gambar 2.12 <i>Salient pole type magnetic spur gear</i> .....	28
Gambar 2.13 Hasil simulasi analisa torsi dari <i>magnetic spur gear</i> .....	30
Gambar 2.14 Hasil simulasi analisa torsi dari <i>inner type magnetic spur gear</i> .....	30
Gambar 2.15 Hasil simulasi analisa torsi dari <i>salient pole type magnetic spur gear</i> .....	31
Gambar 2.16 (a). External magnetic gear dengan magnet berbentuk persegi panjang (b). Geometri <i>external magnetic gear</i> .....	32
Gambar 2.17 (a). Hubungan antara torsi dengan jumlah pasangan magnet permanen (b). Hubungan antara torsi dengan jarak air gap (c) Hubungan antara torsi dengan remanence magnet permanen.....	33
Gambar 3.1 Flowchart penelitian .....	35
Gambar 3.2 Spesifikasi MSGA-MSGB <i>module</i> 1,5 (a) Gambar Teknik (b) Dimensi (c) Dimensi dan torsi .....	38
Gambar 3.3 Diagram alir simulasi.....	39

Gambar 3.4 (a) <i>Sketch</i> HS rotor (b) <i>Sketch</i> LS rotor (c) <i>Sketch</i> magnet permanen .....	42
Gambar 3.5 (a) Model 3D HS rotor (b) Model 3D LS rotor (c) Model 3D magnet permanen .....	43
Gambar 3.6 Hasil <i>input dan assembly</i> 3D model.....	45
Gambar 3.7 <i>Material properties</i> (a) <i>Glass</i> (b) <i>NdFe35</i> .....	45
Gambar 3.8 Pembuatan region .....	46
Gambar 3.9 Bentuk <i>meshing</i> .....	46
Gambar 3.10 <i>Setup</i> analisis <i>mesh</i> .....	47
Gambar 3.11 Hasil analisis <i>mesh</i> .....	48
Gambar 3.12 <i>Setting motion</i> .....	48
Gambar 3.13 <i>Setup</i> analisis .....	49
Gambar 3.14 <i>Validation check</i> .....	49
Gambar 3.15 Nilai dan arah vector <i>flux density</i> .....	50
Gambar 3.16 (a) Grafik torsi HS rotor terhadap waktu (b) Grafik torsi LS terhadap waktu.....	50
Gambar 4.1 Nilai dan arah <i>flux density</i> 3D .....	53
Gambar 4.2 Grafik perbandingan <i>air gap</i> vs trsi pada HS rotor.....	54
Gambar 4.3 Hasil simulasi HS rotor dengan magnet permanen 20 dan <i>air gap</i> 0,5 mm (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi (c) Nilai B.....	56
Gambar 4.4 Hasil simulasi HS rotor dengan magnet permanen 24 dan <i>air gap</i> 0,5 mm (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi (c) Nilai B.....	57
Gambar 4.5 Hasil simulasi HS rotor dengan magnet permanen 30 dan <i>air gap</i> 0,5 mm (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi (c) Nilai B .....	58
Gambar 4.6 Grafik perbandingan <i>air gap</i> vs torsi pada LS rotor.....	59
Gambar 4.7 Hasil simulasi LS rotor dengan magnet permanen 40 dan <i>air gap</i> 0,5 mm (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi (c) Nilai B.....	60
Gambar 4.8 Hasil simulasi LS rotor dengan magnet permanen 24 dan <i>air gap</i> 0,5 mm (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi (c) Nilai B.....	61
Gambar 4.9 Hasil simulasi LS rotor dengan magnet permanen 60 dan <i>air gap</i> 0,5 mm (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi (c) Nilai B.....	62

Gambar 4.10 Grafik perbandingan jumlah magnet permanen terhadap torsi pada HS rotor.....	63
Gambar 4.11 Grafik perbandingan jumlah magnet permanen terhadap torsi pada LS rotor .....	64
Gambar 4.12 Perbandingan torsi <i>mechanical gear</i> dan <i>magnetic gear</i> .....	65

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Torque density dari beberapa jenis mechanical maupun magnetic gear .....	15
Tabel 2.2 <i>Temperatur Curie</i> pada magnet permanen.....	24
Tabel 2.3 <i>Properties</i> utama pada beberapa jenis magnet permanen. ....	26
Tabel 2.4 Dimensi <i>magnetic spur gear</i> yang digunakan.....	28
Tabel 2.5 Hasil analisa torsi dengan beberapa variasi. ....	29
Tabel 2.6 Spesifikasi magnet dan dimensi <i>external magnetic gear</i> . ....	32
Tabel 3.1 Spesifikasi pemodelan yang digunakan. ....	44
Tabel 3.2 Lembar data hasil penelitian. ....	51

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**



## BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan akan dijelaskan mengenai latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan dan manfaat dari penelitian, ruang lingkup dalam penyelesaian permasalahan, dan sistematika penulisan laporan tugas akhir.

### 1.1 Latar Belakang

Roda gigi adalah alat pentransmisi daya dan pengubah tingkat putaran poros pada mesin. Roda gigi juga digunakan untuk mengubah arah sumbu putar dan mengubah gerak rotasi menjadi translasi. Roda gigi memainkan peranan penting dalam menjalankan peralatan yang menunjang kehidupan manusia. Roda gigi dipakai pada alat transportasi, seperti mobil, *gear box*, mesin-mesin perkakas, mesin-mesin industri, mesin-mesin pertanian, *gear motor*, dan lain-lain. Roda gigi meneruskan daya dari motor melalui kontak antar gigi-gigi pada *pinion* dengan gigi-gigi pada *gear*, kemudian diteruskan dengan *rolling* dan gelinding pada daerah *dedendum* (di bawah *pitch line*) dan *addendum* (di atas *pitch line*). Salah satu jenis roda gigi yang banyak digunakan yaitu roda gigi lurus (*spur gear*).

Roda gigi merupakan bagian yang penting di segala bidang sebagai alat transmisi selama 200 tahun terakhir ini. Penggunaannya dimulai dari alat pengukur yang kecil dan teliti, seperti jam tangan, sampai roda gigi reduksi pada turbin besar yang berdaya puluhan megawatt. Sebagian besar mesin modern saat ini menggunakan roda gigi karena keunggulan roda gigi dibandingkan alat pentransmisi lainnya. Kelebihan tersebut meliputi :

- Sistem transmisinya ringkas dengan putaran yang lebih tinggi dan daya yang besar.
- Sistem yang kompak sehingga konstruksinya sederhana.
- Keatahanan uji (*reliability*) yang tinggi dan berumur panjang.
- Mudah dalam perawatan.

- Kemampuan menerima beban lebih tinggi.
- Efisien tinggi dalam memindahkan daya karena tidak terjadinya *slip*.

Ketika dua buah gigi bertautan, terjadi kontak pada daerah *pitch line* yang diikuti dengan *rolling* pada bagian atas dan bawah garis ini. Kontak dan *rolling* di permukaan gigi pada tegangan yang tinggi berlangsung secara berulang sehingga menimbulkan *inherent wear* yang dapat memicu terjadinya *failure*. Akibat adanya kontak ini juga menimbulkan beberapa kerugian-kerugian, antara lain terjadinya keausan dikarenakan adanya kontak antar gigi-gigi roda gigi, kebisingan, panas akibat kontak dua metal bisa sangat tinggi, dapat rusak apabila dikenai kondisi torsi yang berlebihan karena tidak terjadinya *slip* pada roda gigi, memerlukan pelumasan yang baik, perawatan secara rutin dimana getaran dan keandalan menjadi perhatian utama.

Sumber kegagalan roda gigi pada dasarnya berasal dari dua buah tegangan yang bekerja pada gigi-gigi yang saling bertautan, yaitu tegangan kontak dan tegangan *bending*. Tegangan-tegangan ini akan sangat cepat memicu kegagalan jika dipadukan dengan kesalahan-kesalahan dalam perancangan, pemasangan, dan manufaktur roda gigi. Menurut (Mulyadi, 2011), kegagalan-kegagalan yang terjadi pada roda gigi adalah *wear*, *surface fatigue failure*, *plastic flow*, dan *breakage failure*.

#### ❖ *Wear*

*Wear* adalah fenomena pada permukaan gigi dimana lapisan-lapisan metal terlepas dari permukaan akibat adanya kontak antara permukaan gigi-gigi pada roda gigi.

#### ❖ *Surface Fatigue Failure*

*Surface fatigue failure* adalah pembentukan lubang-lubang di permukaan gigi dikarenakan pengurasan metal akibat tegangan yang berfluktuasi.

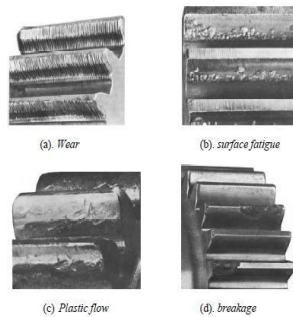
#### ❖ *Plastic Flow*

*Plastic flow* adalah *cold working* pada permukaan gigi yang disebabkan karena tingginya tegangan kontak dan aksi *sliding* dan *rolling* yang terjadi pada dua gigi yang bertautan.

### ❖ *Breakage Failure*

*Breakage failure* adalah patahan yang terjadi pada keseluruhan atau sebagian besar bagian dari sebuah gigi. Umumnya disebabkan oleh kelebihan beban dan siklus tegangan yang bekerja diluar batas ketahanan gigi dari roda gigi tersebut.

Berikut merupakan contoh kegagalan-kegagalan yang terjadi pada roda gigi, ditunjukkan pada Gambar 1.1.



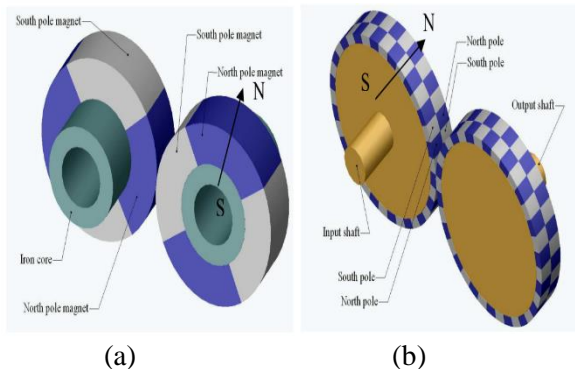
Gambar 1.1 Contoh-contoh bentuk kegagalan pada roda gigi

Mengingat sebuah roda gigi dapat mengalami beberapa kerusakan maka diperlukan adanya sebuah perancangan yang tepat, akurat, dan teliti, terutama roda gigi pada mesin-mesin industri. Pada mesin industri, mesin-mesin saling terhubung dengan komponen peralatan yang lain dalam sebuah sistem produksi. Jika roda gigi pada salah satu mesin rusak maka akan menyebabkan kerusakan yang beruntun pada komponen yang lain dalam sistem tersebut. Karena kondisi tersebut tidak hanya akan menambah biaya produksi untuk memperbaiki, namun bisa saja akan membuat proses produksi terhenti.

Untuk mengurangi kegagalan-kegagalan yang terjadi pada gigi roda gigi, banyak peneliti dan industri-industri yang melakukan riset pada inovasi terbaru yaitu *magnetic gear*. Dimana *magnetic gear* ini menggantikan gigi-gigi pada roda gigi dengan magnet sehingga tidak terjadi kontak antar gigi-gigi dari roda gigi. Karena

tidak adanya kontak antar gigi-giginya maka *magnetic gear* memiliki banyak keunggulan dari roda gigi biasa, diantaranya adalah tidak memerlukan pelumasan, panas yang timbul menjadi sedikit, umur dari *gear* bertambah panjang, dsb. Jenis-jenis *magnetic gear* sama dengan roda gigi biasa/*mechanical gear* seperti *axial eksternal magnetic spur gear* salah satunya yang akan dibahas dalam tugas akhir ini.

*Axial external magnetic spur gear* merupakan *external magnetic spur gear* dimana disetiap gigi-gigi *magnetic gear* ini, magnet permanennya memiliki kutub utara dan kutub selatan dengan *magnetitation* dalam arah aksial seperti pada Gambar 1.2 (b). Dengan model ini, fluks magnet tidak mengikuti arah putaran *gear* seperti pada *radial external magnetic spur gear* (Gambar 1.2 (a)), namun fluks magnet searah dengan poros *magnetic spur gear*. Pada model ini keuntungan yang didapat yaitu meningkatnya fluks magnet sehingga dapat meningkatkan torsi maksimumnya. (Jørgensen, 2010)



Gambar 1.2 (a). *Radial external magnetic spur gear* (b). *Axial external magnetic spur gear*

Dalam tugas akhir ini model *axial eksternal magnetic spur gear* dianalisa dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*). Inti dari *Finite Element Method* (FEM) adalah membagi suatu benda yang akan dianalisa menjadi beberapa

bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Dengan mengembangkan model 2D/3D FE yang nyata, diharapkan dapat membantu pendekatan hasil dalam perencanaan *axial eksternal magnetic gear*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh jumlah magnet permanen yang digunakan terhadap torsi yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh jarak *air gap* terhadap torsi yang dihasilkan?

## 1.3 Tujuan Masalah

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh jumlah magnet permanen yang digunakan terhadap torsi yang dihasilkan.
2. Untuk mengetahui pengaruh jarak *air gap* terhadap torsi yang dihasilkan.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Topologi *magnetic gear* yang digunakan adalah *axial eksternal spur gear*.
2. Jenis magnet permanen yang digunakan adalah magnet *neodymium* (NdFeB).
3. Perhitungan pada *magnetic gear* menggunakan metode analisa 3D *finite element* menggunakan *software* ANSYS Electronics v17.2.
4. Rasio putaran *magnetic gear* yang digunakan adalah 1:2.
5. Pengaruh perubahan temperatur tidak dimodelkan.
6. Variasi *air gap* yang digunakan adalah 0,50 mm, 0,75 mm,

1 mm, dan 1,5 mm.

7. Variasi jumlah magnet permanen yang digunakan 20 dan 40, 24 dan 48, serta 30 dan 60.

8. Geometri *magnetic gear* berdasarkan dengan spesifikasi katalog *ground spur gear* Kohara Gear Industry Co.,Ltd, dengan jari-jari HS rotor sebesar 21 mm dan jari-jari LS rotor sebesar 39 mm.

#### 1.5 Manfaat Penulisan

Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai inovasi yang dapat menjadi masukan bagi produsen roda gigi dan industri-industri dalam pengembangan serta penggunaan *magnetic gear*. Dengan inovasi ini diharapkan kedepannya dapat membantu masyarakat dalam mengurangi masalah yang sering terjadi pada *mechanical gear*.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan berisi mengenai gambaran umum dari setiap bab pada laporan tugas akhir. Laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

### BAB I PENDAHULUAN

Bab pendahuluan menjelaskan mengenai latar belakang, tujuan dan manfaat penelitian tugas akhir ini, ruang lingkup yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini dan pengerjaan laporan, serta sistematika penulisan laporan penelitian tugas akhir ini.

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab tinjauan pustaka akan menjelaskan mengenai literatur-literatur yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini. Selain itu, akan dijelaskan review penelitian-penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai dasar referensi dari penelitian tugas akhir ini.

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab metodologi penelitian tugas akhir ini akan menjelaskan

mengenai metodologi yang digunakan selama penelitian berlangsung.

#### **BAB IV DATA ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Bab pembahasn ini berisikan analisis data dari hasil penelitian tugas akhir yang sudah dilakukan.

#### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini akan membahas mengenai kesimpulan dari hasil penyelesaian permasalahan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai dan saran yang dapat diberikan terhadap penelitian tugas akhir ini.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**



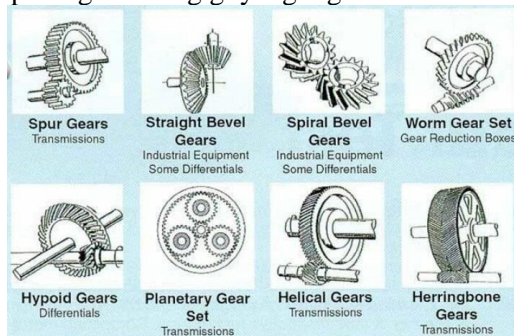
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab tinjauan pustaka akan dijelaskan mengenai referensi atau studi literatur yang digunakan dalam penelitian yang berasal dari buku, jurnal, dan sumber lainnya sebagai landasan dalam pengerjaan penelitian.

#### 2.1 Roda Gigi

Roda gigi (*mechanical gear*) merupakan salah satu elemen mesin yang banyak digunakan sebagai alat pentransmisi torsi (daya) dan pengubah tingkat putaran poros di berbagai aplikasi industri. Roda gigi meneruskan daya dari motor melalui kontak antar gigi-giginya. Bagian dari pasangan roda gigi yang berfungsi untuk menggerakkan roda gigi pasangannya disebut *pinion*. Sedangkan pasangan roda gigi yang digerakkan disebut *gear*.



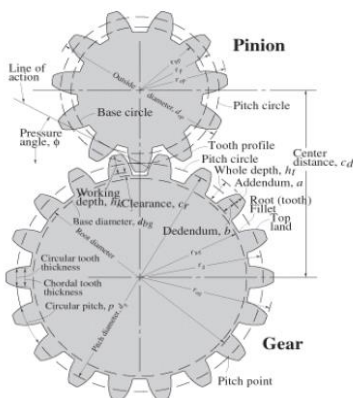
Gambar 2.1 Macam-macam jenis roda gigi

Roda gigi digunakan dalam beberapa aplikasi seperti mobil, *gear box*, mesin-mesin perkakas, mesin-mesin industri, mesin-mesin pertanian, *gear motor*, dan lain-lain. Roda gigi banyak dipilih karena memiliki torsi density yang tinggi, namun terdapat beberapa kekurangan seperti adanya gesekan antar komponen yang dapat menyebabkan keausan, kebisingan yang ditimbulkan, panas yang ditimbulkan bisa sangat tinggi, biasanya

rusak apabila dikenai kondisi torsi yang berlebih, memerlukan pelumasan, perawatan secara rutin, dimana getaran dan keandalan menjadi perhatian utama. (Mulyadi, 2011)

### 2.1.1 Roda Gigi Lurus (*Spur Gear*)

Roda gigi lurus merupakan salah satu jenis roda gigi yang memiliki geometri paling sederhana dan paling banyak digunakan. Terdiri dari silinder atau piringan dengan gigi-gigi yang terbentuk secara radial. Ujung dari gigi-gigi tersebut berbentuk lurus dan tersusun paralel terhadap aksis rotasi. Fungsi dari roda gigi lurus ini adalah untuk mentransmisikan torsi (daya) dan pengubah tingkat putaran poros yang sejajar (paralel). Bagian-bagian dan penamaan dari roda gigi lurus terlihat pada Gambar 2.2. (Deutschman, Michels, & Wilson, 1975)

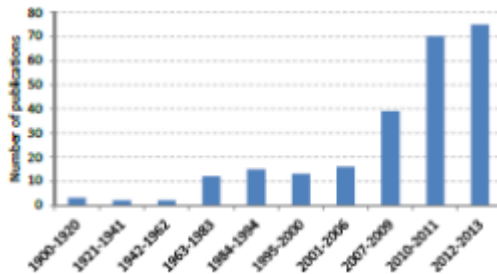


Gambar 2.2 Geometri roda gigi lurus (*spur gear*)

## 2.2 Magnetic Gear

*Magnetic gear* merupakan inovasi terbaru dari para *engineer* dalam pengembangan teknologi pada roda gigi dimana gigi-gigi roda gigi digantikan dengan magnet permanen sehingga tidak adanya kontak antar gigi-gigi dalam hal meneruskan torsi (daya) dan perubahan tingkat putaran poros. Dalam beberapa tahun belakangan ini, *magnetic gear* (MG) banyak mendapat perhatian dari beberapa lembaga penelitian dan insutri-industri.

Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya riset-riset yang dilakukan setelah tahun 2000, terutama dalam dekade terakhir seperti terlihat pada Gambar 2.3 (Tlali, Wang, & Gerber, 2014). Diperkirakan bahwa pengembangan teknologi yang berkelanjutan dari *magnetic gear* akan membuatnya lebih dekat menjadi aplikasi komersial.

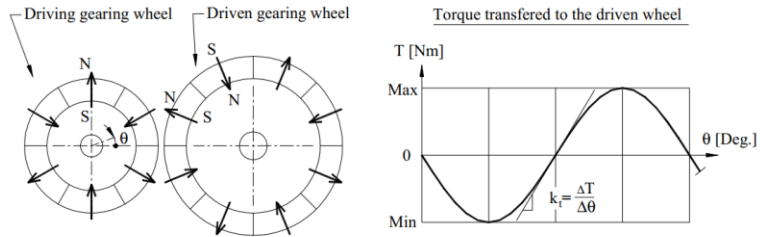


Gambar 2.3 Riset pada *magnetic gear*

*Magnetic gear* (MG) menawarkan solusi dari kekurangan-kekurangan yang ada pada *mechanical gear*. Beberapa kelebihan signifikan yang ada pada *magnetic gear* antara lain, tidak ada gesekan/kontak antar komponennya sehingga tidak ada keausan yang terjadi, pengurangan kebisingan yang ditimbulkan, pengurangan panas yang ditimbulkan, tidak terjadi kerusakan apabila dikenai kondisi torsi yang berlebihan, tidak memerlukan pelumasan, bebas perawatan, minim getaran dan keandalan yang lebih baik. Namun terdapat beberapa kekurangan pada *magnetic gear* dikarenakan *torque density* pada *magnetic gear* relatif rendah dan kompleksitas dari sistem magnetik. Maka dari itu, dilakukan riset-riset agar *torque density magnetic gear* dapat meningkat sehingga pengaplikasian *magnetic gear* dapat lebih luas lagi. (Raj, Varghese, Nair, & Vincent, 2016)

Dikarenakan tidak adanya kontak sehingga tidak terjadi aus pada *magnetic gear*, namun akan timbul *fictive torsion spring* antar kedua *gear*. *Fictive torsion spring* bisa dijelaskan dengan satu

*gear* diam dan *gear* lainnya berputar dengan sudut yang kecil. Pada *mechanical gear* dikenal dengan nama *backlash*. Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar 2.4 dimana terdapat *magnetic gear* penggerak dan yang digerakkan.



Gambar 2.4 *Magnetic gear* dan diagram torsi

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa *magnetic gear* memiliki batas torsi maksimal  $T_{max}$ , dimana apabila *magnetic gear* dikenai torsi melebihi torsi maksimalnya maka akan terjadi *slip* sehingga sebisa mungkin pengoperasian *magnetic gear* harus berada dibawah torsi maksimalnya. Pada *magnetic gear* juga terjadi *torsion spring* ( $k_t$ ), seperti pada persamaan (2.1).

$$k_t = \frac{\Delta T}{\Delta \theta} \quad (2.1)$$

Dimana :

$k_t$  = *torsion spring* (Nm/rad)

$\Delta T$  = perubahan torsi (Nm)

$\Delta \theta$  = perubahan sudut (rad)

### 2.2.1 Torque Density

Dalam upaya memperbaiki atau meningkatkan desain dan performa dari suatu sistem mekanik, perancang, produsen, dan konsumen harus mempertimbangkan beberapa parameter-parameter yang ada. Salah satu parameter yang sering dipandang sebelah mata yaitu *torque density*. Meskipun tidak sebagai pertimbangan utama seperti pengukuran lainnya, *torque density* dapat membantu para perancang membuat keputusan yang lebih

baik.

Torsi didefinisikan sebagai besaran dari gaya yang melawan pada objek yang berputar, seperti baut. *Torque Density* menunjukkan kemampuan torsi suatu objek, dimana torsi per unit volume atau torsi per total unit volume diberikan. Satuan SI dari *torque density* berupa *Joule* per meter kubik atau *foot-pounds per cubic foot* dalam satuan *British*. Singkatnya, *torque density* mengukur kemampuan suatu objek dalam membawa torsi pada berat dan ukuran tertentu.

Parameter performa seperti ini juga bisa diaplikasikan pada *magnetic gear*. *Gear* dengan permanen magnet memiliki volume dari rotor dan volume ini dibandingkan dengan torsi maksimum yang bisa disalurkan dinamakan dengan torsi density aktif, yang dinyatakan pada persamaan (2.2). (Jørgensen, 2010)

$$\rho_a = \frac{T_{max}}{V_A} \quad (2.2)$$

Dimana :

$\rho_a$  = *active torque density* (Nm/m<sup>3</sup>)

$T_{max}$  = torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)

$V_A$  = volume rotor (m<sup>3</sup>)

*Active torque density* ( $\rho_a$ ) cocok digunakan sebagai parameter untuk membandingkan antara jenis magnetik gear yang satu dengan jenis magnetik gear yang lainnya.

*Torque density* yang dihasilkan oleh *magnetic gear* harus dibandingkan dengan *torque density* pada *mechanical gear*. Hal ini sangat diperlukan guna mengetahui keunggulan yang ada pada *magnetic gear*. Semakin baik torsi density yang dihasilkan dari *magnetic gear* merupakan tujuan utamanya. Untuk mencari *total torque density* ( $\rho_R$ ) pada *magnetic gear* dengan menggunakan persamaan (2.3).

$$\rho_R = \frac{T_{max}}{V_T} \quad (2.3)$$

Dimana :

$$\begin{aligned}\rho_R &= \text{total torque density (Nm/m}^3\text{)} \\ T_{\max} &= \text{torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)} \\ V_T &= \text{volume total (m}^3\text{)}\end{aligned}$$

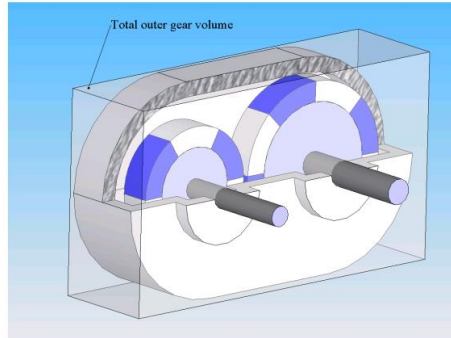
Sedangkan untuk *mechanical gear*, *torque density* dihitung dari torsi nominal  $T_{\text{nom}}$  seperti pada persamaan (2.4).

$$\rho_T = \frac{T_{\text{nom}}}{V_T} \quad (2.4)$$

Dimana :

$$\begin{aligned}\rho_T &= \text{total torque density (Nm/m}^3\text{)} \\ T_{\text{nom}} &= \text{rated nominal torque (Nm)} \\ V_T &= \text{volume total (m}^3\text{)}\end{aligned}$$

Dengan volume  $V_t$  yang digunakan pada dua persamaan diatas adalah volume total terluar dari *gear*. Volume terluar tersebut berupa perkiraan volume sekitar *gearbox* untuk mempermudah perhitungan. Seperti pada ilustrasi berikut.



Gambar 2.5 Ilustrasi perhitungan volume  $V_t$  suatu *gearbox*

Berikut merupakan *torque density* dari beberapa jenis *mechanical gear* maupun *magnetic gear* dalam volume yang sama ditunjukkan pada Tabel 2.1.(Tlali, Wang, & Gerber, 2014). Ketika suatu rancangan berada pada tahap evaluasi, *torque density* dapat digunakan sebagai salah satu pertimbangan dalam pemilihan

beberapa konsep rancangan yang ada.

Tabel 2.1 *Torque density* dari beberapa jenis *mechanical* maupun *magnetic gear*

<i>Gear Type</i>	<i>Torque Density</i> ( $\text{kN/m}^3$ )
<i>Mechanical spur gear</i>	100-200
<i>Mechanical helical gear</i>	50-150
<i>Magnetic worm gear</i>	<2
<i>Magnetic bevel gear</i>	<5
<i>Magnetic spur gear</i>	10-20
<i>Magnetic harmonic gear</i>	140-180
<i>Magnetic planetary gear</i>	~100
<i>Coconcentric magnetic gear</i>	70-50

### 2.2.2 Efisiensi

*Mechanical* dan *magnetic gear* memiliki efisiensi untuk mengukur seberapa bagus *gear* tersebut sehingga dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam pemilihan rancangan. Efisiensi ini didefinisikan sebagai hubungan antara *power* (daya) pada poros keluaran dibagi dengan *power* pada poros masukan, yang dinyatakan pada persamaan (2.5).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.5)$$

Dimana :

$\eta$  = efisiensi

$P_{out}$  = daya pada poros keluaran (W)

$P_{in}$  = daya pada poros masukan (W)

### 2.2.3 Hubungan antara Jumlah Magnet terhadap Rasio Putaran

Untuk mendapatkan rasio putaran pada *magnetic gear* sebenarnya tidak ada perbedaan yang signifikan dengan pencarian rasio pada *mechanical gear*. Rasio putarannya sangat bergantung pada banyaknya jumlah magnet  $N_{in}$  pada *gear* yang dikenai

putaran masukan (*driving gearing wheel*) dan banyaknya jumlah magnet Nout pada *gear* yang menghasilkan putaran keluaran (*driven gearing wheel*). Hubungan ini dapat dilihat pada persamaan (2.6).

$$R_g = \frac{N_{in}}{N_{out}} \quad (2.6)$$

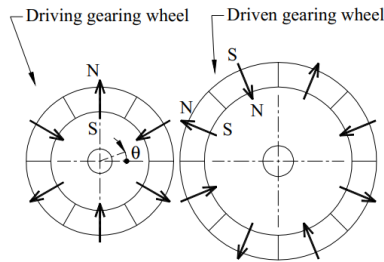
Dimana :

$R_g$  = rasio gigi

$N_{in}$  = jumlah magnet pada poros masukan

$N_{out}$  = jumlah magnet pada poros keluaran

Kebanyakan rasio putaran *gear* lebih besar dari 1, dimana kecepatan putaran pada poros masukan tinggi sedangkan putaran pada poros keluaran rendah.



Gambar 2.6 *External magnetic spur gear*

#### 2.2.4 Perhitungan *Magnetitation* Paralel

*Magnetitation* parallel source magnet terdapat pada arah radial dan tangensial. Persamaan (2.7) digunakan untuk mencari *magnetitation* paralel.

$$M_s(r, \varnothing) = M_r \cdot \hat{r} + M_{\varnothing} \cdot \hat{\varphi} \quad (2.7)$$

Dimana :

$M_r$  = *magnetitation* arah radial (A/m)

$M_{\varnothing}$  = *magnetitation* arah tangensial (A/m)

#### 2.2.5 Perhitungan *Drive Magnet Surface Current Density*



Kesetimbangan *surface current density* adalah distribusi *current density* yang memberikan medan magnet yang sama seperti magnet permanen. Persamaan (2.8) menunjukkan *current density* untuk permukaan luar dan dalam.

$$j_m(p, r, \Phi, \theta) = M_s \sin(\theta) \hat{z}, r = R_2 \quad (2.8)$$

$$j_m(p, r, \Phi, \theta) = -M_s \cos(\theta) \hat{z}, r = R_1$$

dengan,

$$\Phi - \frac{\pi}{N_{pole}}(1 + 2p) \leq \theta \leq \Phi + \frac{\pi}{N_{pole}}(1 + 2p) \quad (2.8)$$

Dimana :

$j_m$  = *surface current density* (A/m<sup>2</sup>)

$M_s$  = *magnetitation source magnet* (A/m)

$\theta$  = sudut tertentu *source magnet* (rad)

$\hat{z}$  = vector ke arah z

## 2.2.6 Pehitungan *External Flux Density Field*

Persamaan (2.9) dan (2.10) menunjukkan  $B_x^{\text{ext}}$  dan  $B_y^{\text{ext}}$  pada *drive magnet* yang dihasilkan dari medan *source magnet*.

$$B_x^{\text{ext}}(r, \Phi) = B_{r'}^{\text{ext}}(r'(r, \Phi), \Phi'(r, \Phi) \cos(\Phi'(r, \Phi)) - B_{\Phi'}^{\text{ext}}(r'(r, \Phi), \Phi'(r, \Phi) \sin(\Phi'(r, \Phi)) \quad (2.9)$$

$$B_y^{\text{ext}}(r, \Phi) = B_{r'}^{\text{ext}}(r'(r, \Phi), \Phi'(r, \Phi) \sin(\Phi'(r, \Phi)) - B_{\Phi'}^{\text{ext}}(r'(r, \Phi), \Phi'(r, \Phi) \cos(\Phi'(r, \Phi)) \quad (2.10)$$

Dimana:

$B_x^{\text{ext}}$  = x-direction external flux density field (Wb)

$B_y^{\text{ext}}$  = y-direction external density flux field (Wb)

$B_{r'}^{\text{ext}}$  = radial external flux density field (Wb)

$B_{\Phi'}^{\text{ext}}$  = tangensial external flux density field (Wb)

$r'$  = transformasi radius ke koordinat *drive magnet*

$\Phi'$  = transformasi tangensial ke koordinat *drive magnet*

### 2.2.7 Perhitungan Torsi

Dalam mencari nilai torsi dari *drive magnet*, pertama harus mengurai sistem menjadi distribusi yang seimbang antara *current densities* volume dan permukaan ( $J_m$  dan  $j_m$ ). Persamaan torsi yang terdiri dari dua integral dimana  $V$  dan  $S$  secara berurutan adalah volume dan permukaan magnet, yang dinyatakan dalam persamaan (2.11).

$$T = \int_V r \times (J_m(r, \phi) \times B_{ext}) r dr d\phi dz + \int_S r \times (j_m \times B_{ext}) da \quad (2.11)$$

Dimana :

$T$  = torsi (Nm)

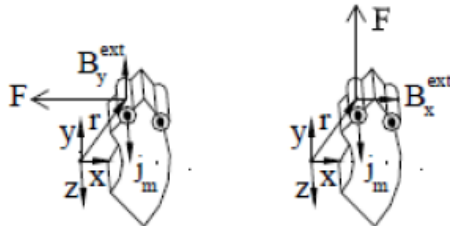
$r$  = vector pada sumbu- $r$

$J_m$  = *volume current density* (A/m<sup>2</sup>)

$j_m$  = *surface current density* (A/m)

$B_{ext}$  = *external flux density field* (Wb)

Karena  $J_m = \nabla \times M = 0$ , maka integral volume yang pertama menjadi nol dan yang tersisa hanya hasil integra permukaan. Semua *current density* pada permukaan harus dilalui oleh  $B_{ext}$  dari *source* tersebut, seperti pada Gambar 2.7 yang mengilustrasikan sketsa isometrik.



Gambar 2.7 Ilustrasi perhitungan torsi

Terdapat dua integrasi pada perhitungan torsi, yaitu integrasi permukaan radial dan integrasi permukaan tangensial. Integrasi radial dilakukan pada arah radial bidang permukaan magnet. Persamaan untuk torsi radial didapatkan dengan

menggunakan metode integrasi *Simpson*, yang dinyatakan dalam persamaan (2.12).

$$T_r(\emptyset) = \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right) L(R_2 - R_1)}{N_r} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) r(q) \times [\cos(\emptyset_{edge}(\emptyset, p) B_x^{ext}(r(q), \emptyset_{edge}(\emptyset, p))) + \sin(\emptyset_{edge}(\emptyset, p) B_x^{ext}(r(q), \emptyset_{edge}(\emptyset, p)))] \quad (2.12)$$

Dimana :

$T_r(\emptyset)$  = torsi radial (Nm)

$M_s$  = magnetitation source magnet (A/m)

$N_p$  = jumlah magnet pada *source magnet gear*

$N_{pole}$  = jumlah magnet pada *drive magnet gear*

$L$  = panjang/tinggi magnet (m)

$R_1$  = radius dalam *drive magnet* (m)

$R_2$  = radius luar *drive magnet* (m)

$p$  = jumlah kutub magnet

$q$  = parameter dari integrasi

$S_r(q)$  = parameter dari integrasi

$\emptyset_{edge}$  = sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)

$\emptyset$  = sudut putar *drive magnet* (rad)

$B_x^{ext}$  = x-direction external flux density field (Wb)

$B_y^{ext}$  = y-direction external flux density field (Wb)

Sedangkan untuk integrasi permukaan tangensial dilakukan pada dua permukaan radial. Untuk mendapatkan hasilnya digunakan metode integrasi *Simpson*, yang dinyatakan dalam persamaan (2.13) dan (2.14).

$$T_{t1}(\emptyset) = - \frac{M_s L R_2^1 \left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right)}{N_t} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_{pole}-1} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[ \cos(\theta(q) + \right.$$

$$p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset) B_x^{ext} \left( R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset \right) + \sin \left( \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset \right) B_y^{ext} \left( R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset \right)] \quad (2.13)$$

$$T_{t2}(\emptyset) = \frac{M_s L R_2^2 \left( \frac{\pi}{N_{pole}} \right)}{N_t} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_{pole}-1} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[ \cos \left( \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset \right) B_x^{ext} \left( R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset \right) + \sin \left( \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset \right) B_y^{ext} \left( R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset \right) \right] \quad (2.14)$$

Dimana :

$T_t(\emptyset)$  = torsi tangensial (Nm)

$M_s$  = *magnetitation source magnet* (A/m)

$N_t$  = parameter integrasi torsi

$N_{pole}$  = jumlah magnet pada *drive magnet gear*

$L$  = panjang/tinggi magnet (m)

$R_1$  = radius dalam *drive magnet* (m)

$R_2$  = radius luar *drive magnet* (m)

$p$  = jumlah kutub magnet

$q$  = parameter dari integrasi

$S_r(q)$  = parameter dari integrasi

$\theta$  = sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)

$\emptyset$  = sudut putar *drive magnet* (rad)

$B_x^{ext}$  = x-direction external flux density field (Wb)

$B^{ext}$  = y-direction external flux density field (Wb)

Persamaan total torsi dari *drive magnet* didapatkan dari penjumlahan dari integral permukaan, yang dinyatakan pada persamaan (2.15).

$$T(\emptyset) = T_r(\emptyset) + T_{t1}(\emptyset) + T_{t2}(\emptyset) \quad (2.15)$$

Dimana :

$T(\emptyset)$  = torsi total (Nm)

$Tr(\emptyset)$  = torsi radial (Nm)

$Tt_1(\emptyset)$  = torsi tangensial dalam (Nm)

$Tt_2(\emptyset)$  = torsi tangensial luar (Nm)

### 2.3 Magnet Permanen

Magnet adalah logam yang dapat menarik besi atau baja dan memiliki medan magnet. Magnet dapat dibuat dari bahan besi, baja, dan campuran logam serta telah dimanfaatkan untuk industri otomotif dan lainnya. Magnet yang paling banyak dikenal adalah yang mengandung besi metalik. Berdasarkan sifat materialnya, material magnet dibedakan menjadi beberapa sifat, yaitu: (Hamidzadeh, 2016)

#### 1. Diamagnetik

Material yang bersifat diamagnetik adalah material yang kekuatan magnetnya sangat lemah dan berlawanan arah dengan medan magnet material magnet lainnya sehingga tidak dapat menarik material lain yang bersifat magnet bahkan terjadi tolak-menolak dengan material yang bersifat magnet disekitarnya.

#### 2. Paramagnetik

Material yang bersifat paramagnetic adalah material yang memiliki kekuatan magnet lemah namun memiliki arah yang searah terhadap medan magnet material magnet lainnya sehingga terjadi tarik-menarik dengan bahan yang bersifat magnet disekitarnya namun kekuatan tarik-menariknya lemah.

#### 3. Ferromagnetik

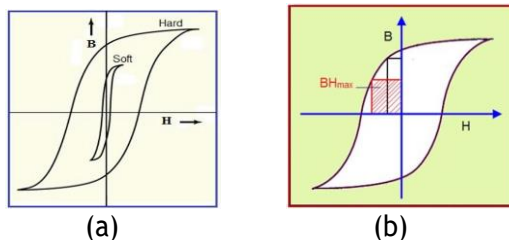
Sifat yang terakhir dan yang paling banyak digunakan adalah material yang bersifat ferromagnetik, dimana material ini memiliki kekuatan magnet yang kuat dan memiliki arah yang searah dengan medan magnet material magnet lainnya sehingga terjadi tarik-menarik dengan magnet disekitarnya dengan kekuatan tarik-menarik yang kuat. Material dengan sifat ferromagnetic biasanya banyak yang dijadikan sebagai bahan dasar dari permanen magnet.

Beberapa elemen lain juga memperlihatkan sifat magnet, tapi tidak semua magnet berwujud logam. Teknologi mutakhir sekarang telah menggunakan keduanya, baik magnet metalik maupun keramik. Teknologi ini juga memanfaatkan elemen-elemen lain untuk meningkatkan kemampuan magnetik. Magnet terdiri dari tiga kriteria, bisa berwujud magnet tetap (magnet permanen), magnet tidak tetap, dan magnet buatan. Magnet permanen adalah magnet yang tidak memerlukan tenaga atau bantuan dari luar untuk menghasilkan daya magnet (berelektromagnetik). Magnet jenis ini dapat mempertahankan kemagnetannya dalam waktu yang sangat lama. Terdapat beberapa jenis magnet permanen yang selama ini diketahui seperti *neodymium* magnet (NdFeb), *samarium-cobalt* magnet (SmCo), keramik magnet, plastik magnet, *alnico* magnet.

Medan magnet ( $H$ ) adalah daerah disekitar magnet yang masih dipengaruhi gaya magnet dan digambarkan dengan garis-garis gaya magnet yang menyebar dari kutub-kutub magnet. Garis-garis gaya magnet ini selalu keluar dari kutub utara menuju kutub selatan dan garis-garis gaya magnet tidak pernah saling berpotongan dengan garis-garis gaya magnet yang lain yang berasal dari magnet yang sama sehingga dapat diketahui apabila medan magnet terkuat terdapat pada kutub-kutub magnet. Suatu medan magnet ( $H$ ) dapat dihasilkan oleh arus listrik atau kutub magnet. Jika medan magnet dihasilkan oleh arus listrik, maka garis-garis medan magnet kontinu dan membentuk loop tertutup. Namun jika medan magnet dihasilkan dari kutub magnet, maka garis-garis medan magnet keluar dari kutub utara menuju kutub selatan. Misal suatu sampel yang termagnetitation oleh medan yang diaplikasikan dari kiri ke kanan dan kemudian medan tersebut dihilangkan, maka kutub utara akan terbentuk di ujung sebelah kanan dan kutub selatan terbentuk disebalah kiri. Kuat medan  $H$  yang menyebabkan bahan magnetik mencapai saturasi adalah  $M_{sat}$ . Pada kondisi saturasi ini seluruh momen magnetik telah disearahkan sesuai dengan arah medan magnet pengimbas. Jika medan pengimbas tersebut kemudian diperkecil atau sampai

dihilangkan, masih terdapat medan sisa pada bahan magnetic yang disebut dengan *remenence*. *Remanence* adalah medan magnet yang tersisa setelah dihilangkannya medan magnet pengimbas.

Histerisis menggambarkan proses *magnetitation* reversal pada bahan magnetik dari kondisi awal yang tidak termagnetitation kemudian diinduksi oleh medan magnetik luar sehingga membentuk kurva histerisis. Tipikal kurva histerisis untuk *soft* ferromagnetik dan *hard* ferromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 (a) Tipikal kurva histerisis *soft* dan *hard* ferromagnetik & (b) *Energy product* ( $BH_{\max}$ )

Karakteristik yang membedakan bahan *softmagnetik* dengan bahan *hardmagnetic* adalah *energy product* ( $BH_{\max}$ ) yang bisa dihasilkan. *Energy product* ( $BH_{\max}$ ) merupakan luasan persegi terbesar yang dapat dibentuk pada quadran kedua.

Bahan *hardmagnetic* merupakan bahan yang memiliki kurva histerisis yang besar dan lebar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 (b). Bahan *hardmagnetic* adalah sebutan untuk bahan yang susah di-*magnetitation* dan juga susah untuk didemagnetisasi yang membuat bahan ini sangat cocok untuk dijadikan bahan dari magnet permanen. Bahan *harmagnetic* dibagi menjadi dua, yaitu magnet konvensional dan magnet tanah jarang. Magnet konvensional memiliki nilai maksimum *energy product* ( $BH_{\max}$ ) berkisar antara 2-80 kJ/m<sup>3</sup>, seperti baja, paduan *Cunife* (Cu-Ni-Fe), paduan *Alnico* (Al-Ni-Co). Bahan *hardmagnetic* yang memiliki energi tinggi seperti Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, SmCo<sub>5</sub> memiliki nilai  $BH_{\max}$  lebih besar dari 80 kJ/m<sup>3</sup> masuk dalam *rare earth magnet*. Bahan *hardmagnetic* biasanya banyak diaplikasikan pada motor,

speaker, bor, dsb, dikarenakan semakin besar  $BH_{max}$  maka bahan magnet tersebut akan sangat susah untuk didemagnetisasi.

### 2.3.1 Demagnetisasi

Demagnetisasi merupakan suatu peristiwa dimana suatu magnet kehilangan sifat kemagnetannya. Terdapat beberapa penyebab terjadinya demagnetisasi, yaitu elektromagnet secara AC dan temperatur pengoperasian. Temperatur dapat mengakibatkan efek *demagnetitation*, dikarenakan dengan meningkatnya temperatur menyebabkan atom-atom yang terdapat pada logam atau magnet bergetar sebanding dengan kenaikan temperatur. Sehingga *magnetic moment* memiliki orientasi yang acak. Semakin tinggi temperatur operasionalnya maka getaran atom-atomnya pun semakin meningkat.

*Magnetitation* sebuah material mencapai batas maksimalnya pada temperatur 0 K (-273°C), karena pergerakan atom paling minimal. Terdapat sebutan temperatur Curie, yaitu temperatur maksimal dimana *magnetitation* suatu material bernilai nol. Besar temperatur Curie setiap material berbeda-beda. Pada Tabel 2.2 ditunjukkan temperatur Curie pada magnet permanen. (Hamidizadeh, 2016)

Tabel 2.2 Temperatur Curie pada magnet permanen

Material	Temperature Curie (°C)
Alnico	850
SmCo	720
Ferrite	450
NdFeB	310

### 2.3.2 Neodymium Magnet (NdFeB)

Magnet *neodymium* merupakan magnet permanen yang paling kuat. Magnet *neodymium* (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet Neo), merupakan sejenis *rare earth magnet*, terbuat dari campuran logam *neodymium*. Dikembangkan pada tahun 1982 oleh *Sumitomo Special Metals*, mereka mengumumkan



telah membuat magnet  $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$  dengan *energy product* sebesar  $290 \text{ kJ/m}^3$ . Ditahun yang sama, *General Motor* di Amerika Serikat juga telah menyelesaikan riset mereka mengenai magnet *neodymium* yang dibuat dengan teknik yang sedikit berbeda dan menghasilkan magnet *neodymium* dengan *energy product* sebesar  $420 \text{ kJ/m}^3$ . Magnet *neodymium* tersebut memegang rekor magnet permanen terkuat yang ada dan menggantikan peran magnet permanen  $\text{SmCo}$  karena harga dari magnet *neodymium* yang lebih murah daripada magnet permanen  $\text{SmCo}$ . (Hamidizadeh, 2016)

Magnet *neodymium* ini diklasifikasikan berdasarkan maksimum *energy product* yang dimiliki. Semakin besar *energy product* yang dimiliki suatu magnet permanen mengindikasikan semakin kuat magnet tersebut. Berikut merupakan urutan klasifikasi dari magnet *neodymium*. (Singh, Gite, & Narkhede, 2014)

- 1.N35-N52
- 2.33M-48M
- 3.30H-45H
- 4.30SH-42SH
- 5.30UH-35UH
- 6.28EH-35EH

Dimana angka yang tertera merupakan besarnya *energy product* yang bisa dihasilkan, sedangkan huruf yang mengikuti dibelakangnya merupakan maksimum temperatur operasinya (*Curie temperature*). Tingkatan dari maksimum temperatur operasinya mulai dari M (dapat digunakan hingga  $100^\circ\text{C}$ ) sampai EH (dapat digunakan hingga  $200^\circ\text{C}$ ).

Terdapat beberapa *properties* utama yang digunakan untuk membandingkan antara magnet *neodymium* dengan magnet permanen lainnya seperti yang tertera pada Tabel 2.3. Pada Tabel 2.3 terdapat beberapa *properties* utama dari beberapa jenis magnet permanen, yaitu: (Hamidizadeh, 2016)

❖ *Remenence*

*Remenance* digunakan untuk mengukur kekuatan medan magnet dari suatu material.

- ❖ *Coercivity*  
*Coercivity* merupakan ketahanan suatu material untuk kehilangan sifat kemagnetannya (*demagnetitation*).
- ❖ *Energy product*  
*Energy product* merupakan rapat energi magnet dari suatu material.
- ❖ *Curie temperature*  
*Curie temperature* merupakan temperatur dimana suatu material dapat kehilangan sifat kemagnetannya.

Tabel 2.3 *Properties* utama pada beberapa jenis magnet permanen

Permanent Magnet	Remenence (T)	Coercivity (kA/m)	Maximum energy product (kJ/m <sup>3</sup> )	Currie Temperature (°C)
Ferrite	0,23-0,39	150-250	8-28	450
Alnico	0,7-1,2	40-120	20-71	850
NdFeB	1,1-1,4	800-1100	235-430	310
SmCO	0,85-1,1	630-800	140-250	720

Berdasarkan Tabel 2.3 dapat dilihat bahwa magnet *neodymium* (NdFeB) lebih baik daripada jenis magnet permanen lainnya dalam beberapa aspek *properties* yang dimiliki. Sehingga magnet *neodymium* banyak digunakan pada alat yang membutuhkan magnet permanen, seperti motor, speaker, bor, dsb. Meskipun *currie temperature* dari magnet *neodymium* lebih rendah daripada SmCo atau Alnico namun *remanence*, *coercivity*, dan *energy product* lebih unggul daripada jenis magnet permanen lainnya dan juga harganya yang lebih murah.

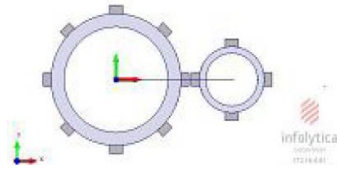


Gambar 2.9 Magnet *neodymium*

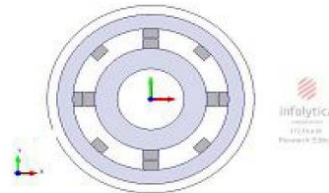
Magnet *neodymium* cenderung rentan terhadap korosi. Secara khusus, korosi sekecil apapun dapat menyebabkan kerusakan magnet. Masalah ini dibahas dalam banyak produk komersial dengan menyediakan lapisan pelindung. Pelapisan nikel atau dua pelapisan tembaga berlapis nikel digunakan sebagai metode standar, meskipun pelapisan dengan logam lainnya atau polimer dan lapisan pelindung pernis juga digunakan.

#### 2.4 Penelitian Terdahulu

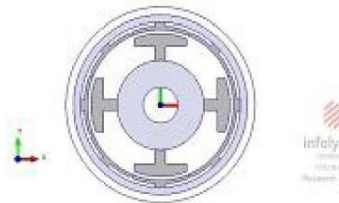
Pada penelitian yang dilakukan oleh G. Muruganandam et al pada tahun 2012 dengan judul “*Torque Analysis of Magnetic Spur Gear with Different Configurations*”, diperoleh perbandingan torsi yang didapat berdasarkan dari variasi *air gap*, material dari permanen magnet, dan tipe *magnetic spur gear* dengan beban yang sama, yang didapatkan dari metode analisis menggunakan *finite element analysis* dan untuk simulasinya menggunakan *software* MagNet (versi 7.1.3). Penelitian ini menunjukkan rancangan dan analisa torsi dari beberapa tipe *magnetic spur gear* dengan material magnet yang berbeda dan dengan *air gap* yang berbeda. *Magnetic spur gear* dirancang dengan dimensi sesuai Tabel 2.4 dengan model rancangan seperti pada Gambar 2.10, Gambar 2.11, dan Gambar 2.12. Variasi yang digunakan pada material magnet permanennya menggunakan magnet permanen NdFeB dan magnet permanen Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> sedangkan untuk variasi *air gap*nya yaitu 1 mm, 2 mm, 3 mm. Untuk permodelan analisa, *gear* dengan kecepatan rendah terhubung dengan penggerak utama sedangkan *gear* dengan kecepatan tinggi terhubung ke beban sehingga cocok untuk aplikasi otomotif, pembangkit tenaga angin dan lain-lain. Nilai torsi didapatkan dari simulasi menggunakan *software* MagNet lalu hasil torsi yang didapat tadi dibandingkan satu sama lain.



Gambar 2.10 *Permanent magnet spur gear*



Gambar 2.11 *Inner type magnetic spur gear*



Gambar 2.12 *Salient pole type magnetic spur gear*

Tabel 2.4 Dimensi *magnetic spur gear* yang digunakan

Description	Units	Magnetic spur gear	Inner type magnetic spur gear	Salient pole type magnetic spur gear
No of low speed rotor poles	-	8	8	8
Outer radius of low speed rotor	mm	28	30	25
Inner radius of low speed rotor	mm	20	21,75	21
No of high speed rotor poles	-	4	4	4

Outer radius of high speed rotor	mm	15,5	10	20
Inner radius of high speed rotor	mm	10	12,5	12,5
Length of the magnetic material	mm	100	100	100
Air gap length	mm	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
Permanent magnet material	-	NdFeB and Sm <sub>2</sub> CO <sub>17</sub>		
Permeability of air region ( $\mu_0$ )	Tm/A	$4\pi \times 10^{-7}$		
Relative permeability of magnets $\mu_r = \mu / \mu_0$	-	1,0523		

Setelah dilakukan simulasi pada rancangan diatas, didapatkan nilai torsi transmisi dengan tipe *magnetic spur gear* yang berbeda, material magnet permanen yang berbeda, dan *air gap* yang berbeda namun dengan beban yang sama di semua variasi, ditunjukkan pada Tabel 2.5. Dapat dilihat pada hasil simulasi Gambar 2.13, Gambar 2.14, dan Gambar 2.15, bahwa torsi maksimum *magnetic spur gear* yang menggunakan magnet permanen NdFeb sebesar 6 Nm dengan *air gap* sebesar 1 mm, sedangkan torsi maksimum pada *inner type magnetic spur gear* sebesar 22,5 Nm, dan torsi maksimum pada *salient pole type magnetic spur gear* sebesar 30 Nm. Dapat disimpulkan bahwa dengan topologi *magnetic spur gear* diatas dengan menggunakan magnet tanah jarang dapat menghasilkan *torque density* yang tinggi dan berdasarkan hasil dari *finite element analysis*, *magnetic gear* dapat diaplikasikan pada otomotif, dan lain-lain.

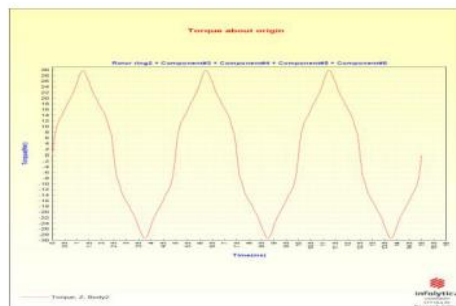
Tabel 2.5 Hasil analisa torsi dengan beberapa variasi

Types of magnetic gear	Sm <sub>2</sub> CO <sub>17</sub>	NdFeB
------------------------	----------------------------------	-------

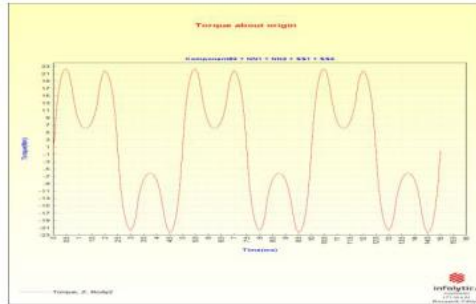
Air gap distance	1 mm	2 mm	3 mm	1 mm	2 mm	3 mm
Torque in magnetic spur gear (Nm)	5,3	4,3	3,2	6	4,8	3,9
Torque in inner type magnetic spur gear (Nm)	21,7	20,1	17,9	22,5	20,5	18,7
Torque in salient pole type magnetic spur gear (Nm)	28,8	25,7	24,2	30,0	26,9	25,3



Gambar 2.13 Hasil simulasi analisa torsi dari *magnetic spur gear*

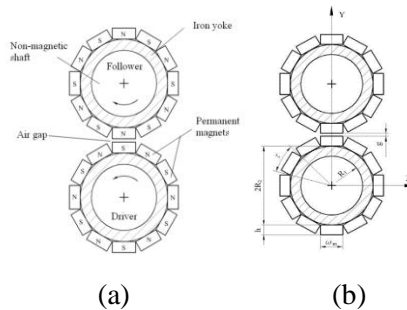


Gambar 2.14 Hasil simulasi analisa torsi dari *inner type magnetic spur gear*



Gambar 2.15 Hasil simulasi analisa torsi dari *salient pole type magnetic spur gear*

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yi-Chang Wu et al pada tahun 2015 dengan judul “*Transmitted Torque Analysis of a Magnetic Gear Mechanism with Rectangular Magnets*” diperoleh pengaruh jumlah pasangan kutub magnet permanen, jarak *air gap*, dan *remanence* magnet permanen terhadap torsi maksimum yang dapat disalurkan dengan menggunakan magnet permanen berbentuk persegi panjang. Digunakan model 2D untuk pemodelan *magnetic gear* dan penggunaan *finite element method* untuk perhitungan torsi maksimum yang dapat disalurkan serta untuk melakukan validasi terhadap model analisisnya. Simulasi menggunakan *software* Ansoft/Maxwell untuk analisa medan magnet dan torsi maksimum yang dapat disalurkan. *Magnetic spur gear* dimodelkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19 dengan dimensi dan spesifikasi permanen magnet yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.6. Variasi jumlah pasang kutub magnet yang digunakan yaitu 5 sampai dengan 10 pasang kutub magnet.



Gambar 2.16 (a). *External magnetic gear* dengan magnet berbentuk persegi panjang (b). Geometri *external magnetic gear*

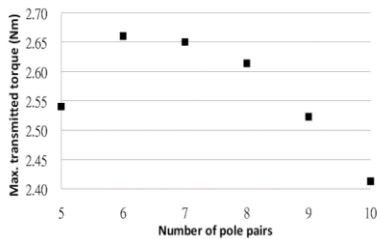
Tabel 2.6 Spesifikasi magnet dan dimensi *external magnetic gear*

NdFeB (N-35) Magnet		
Items	Symbol	Values
Remenence	Br	1,15
Relative permeability	$\mu_r$	1,09
Magnet width (mm)	$w_m$	10,70
Magnet height (mm)	h	5,00
Axial length (mm)	L	40,00
Number of pole pairs	n	6
Geometric dimensions of the gear set		
Items	Symbol	Values
Inner radius of the iron yoke (mm)	R1	15,00
Outer radius of the iron yoke (mm)	R2	20,00
Air gap length (mm)	g	1,50
Length of pole pitch (mm)	$\tau$	11,78
Ratio of pole width to pole pitch	$\alpha_e$	0,91

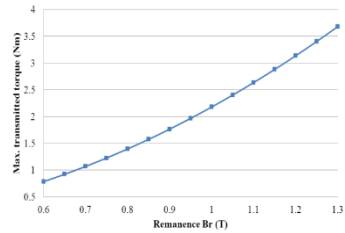
Setelah dilakukan analisa dan simulasi pada permodelan seperti diatas, didapatkan hasil berupa torsi maksimum yang dapat disalurkan naik seiring dengan bertambahnya jumlah dari pasangan



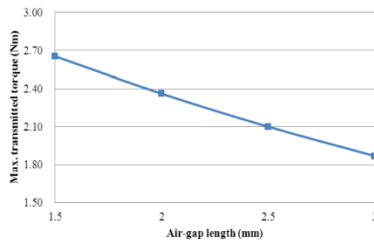
kutub magnet permanen. Torsi maksimum terbesar yang dapat disalurkan terjadi pada saat jumlah pasang kutub magnet berjumlah 6 sebesar 2,66 (hasil perhitungan analitis) dan sebesar 2,87 (hasil FEA) setelah itu terjadi penurunan secara kontinu hingga pasang kutub magnet berjumlah 10. Untuk hubungan antara jarak *air gap* terhadap torsi maksimum yaitu menurun seiring bertambahnya jarak *air gap*, sedangkan hubungan antara *remanence* terhadap torsi maksimum yaitu naik seiring makin besarnya nilai dari *remanence* magnet permanen yang digunakan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.17 (a). Hubungan antara torsi dengan jumlah pasangan magnet permanen (b). Hubungan antara torsi dengan jarak *air gap* (c) Hubungan antara torsi dengan *remanence* magnet permanen

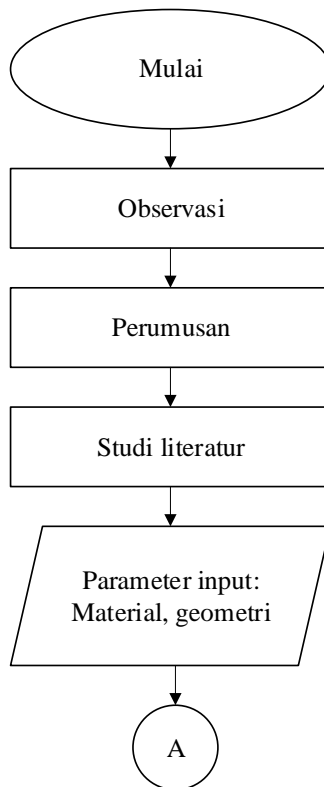
**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

### **BAB III**

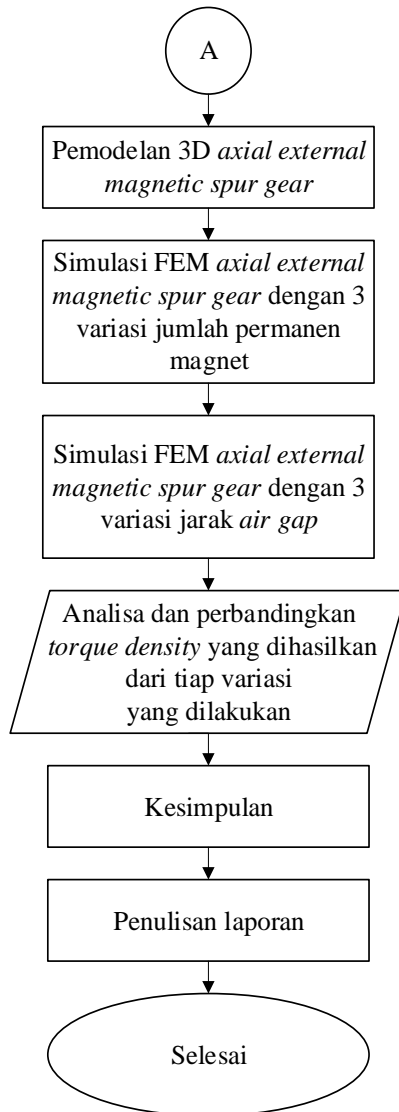
## **METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang dilakukan penulis. Pada bab ini akan dibahas tahapan-tahapan yang dilakukan penulis beserta detailnya dalam melakukan penelitian ini.

### 3.1 Flowchart Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart penelitian



Gambar 3.1 Flowchart penelitian

Gambar 3.1 merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan penulis dalam penulisan laporan ini. Penjelasan secara lebih rinci bagian dari flowchart diatas adalah sebagai berikut:

#### 3.1.1 Observasi

Observasi merupakan langkah pertama yang dilakukan penulis. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk menentukan ruang lingkup permasalahan yang akan diteliti. Pada tahap ini observasi difokuskan pada lingkup *magnetic gear* yaitu *axial external magnetic spur gear*.

#### 3.1.2 Perumusan Masalah

Setelah dilakukan observasi, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah perumusan masalah. Dalam hal ini permasalahan yang dicoba untuk diteliti oleh penulis adalah kurangnya torsi pada *magnetic gear* dibandingkan dengan *torque density* pada roda gigi mekanik. Hal ini dikarenakan kurang kuatnya medan magnet permanen yang digunakan untuk membuat *magnetic gear* sehingga torsi yang bias dicapai tidak bisa sebesar roda gigi mekanik. Maka salah satu cara yang diambil penulis untuk dijadikan rumusan masalah adalah bagaimana pengaruh jumlah magnet yang digunakan terhadap torsi yang dihasilkan dengan metode FEM.

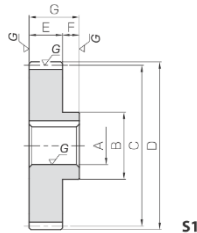
#### 3.1.3 Studi Literatur

Dilakukan studi literatur untuk mendapatkan informasi secara lebih detail serta menunjang penelitian yang akan dilakukan. Informasi berupa dasar teori *magnetic gear*, keuntungan menggunakan *magnetic gear* dibandingkan dengan roda gigi mekanik, pencarian torsi pada *magnetic gear* maupun penelitian terdahulu yang dirangkum penulis berasal dari berbagai sumber.

#### 3.1.4 Penentuan Data Awal

Data awal yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari spesifikasi *ground spur gears* produksi dari Kohara Gear Industry Co.,Ltd. dengan kode MSGA-MSGB dan *module* sebesar 1,5. Dari spesifikasi tersebut diambil parameter dimensi dan torsi yang mampu ditransmisikan. Spesifikasi *ground spur gears* produksi dari Kohara Gear Industry Co., Ltd. dengan kode MSGA1.5-24 (HS Rotor) dan MSGA1.5-48 (LS rotor) dapat dilihat pada Gambar

3.2. Dimana menggunakan rasio putaran 1:2 dengan jumlah gigi yang digunakan 20 dengan 40, 24 dengan 48, serta 30 dengan 60.



(a)

MSGA1.5-24 MSGB1.5-24	m1.5	24	S1	12 15	28	36	39	15	10	25	—	—
MSGA1.5-25 MSGB1.5-25		25	S1	14 16	30	37.5	40.5	15	10	25	—	—
MSGA1.5-30 MSGB1.5-30		30	S1	15 18	30	45	48	15	10	25	—	—
MSGA1.5-35 MSGB1.5-35		35	S1	15 18	32	52.5	55.5	15	10	25	—	—
MSGA1.5-36 MSGB1.5-36		36	S1	15 18	32	54	57	15	10	25	—	—
MSGA1.5-40 MSGB1.5-40		40	S1	16 20	35	60	63	15	10	25	—	—
MSGA1.5-45 MSGB1.5-45		45	S1	16 20	40	67.5	70.5	15	10	25	—	—
MSGA1.5-48 MSGB1.5-48		48	S1	16 20	40	72	75	15	10	25	—	—

(b)

4 x 1.8 5 x 2.3	62.4	41.5	6.36	4.24	0.08~0.16	0.14 0.13	<b>MSGA1.5-24</b> <b>MSGB1.5-24</b>
5 x 2.3 5 x 2.3	66.0	45.4	6.73	4.63	0.08~0.16	0.15 0.14	<b>MSGA1.5-25</b> <b>MSGB1.5-25</b>
5 x 2.3 6 x 2.8	84.7	66.4	8.63	6.77	0.08~0.16	0.21 0.19	<b>MSGA1.5-30</b> <b>MSGB1.5-30</b>
5 x 2.3 6 x 2.8	104	91.5	10.6	9.34	0.10~0.18	0.28 0.26	<b>MSGA1.5-35</b> <b>MSGB1.5-35</b>
5 x 2.3 6 x 2.8	108	97.1	11.0	9.90	0.10~0.18	0.30 0.28	<b>MSGA1.5-36</b> <b>MSGB1.5-36</b>
5 x 2.3 6 x 2.8	123	121	12.6	12.3	0.10~0.18	0.37 0.34	<b>MSGA1.5-40</b> <b>MSGB1.5-40</b>
5 x 2.3 6 x 2.8	143	155	14.5	15.8	0.10~0.18	0.48 0.46	<b>MSGA1.5-45</b> <b>MSGB1.5-45</b>
5 x 2.3 6 x 2.8	155	177	15.8	18.1	0.10~0.18	0.54 0.51	<b>MSGA1.5-48</b> <b>MSGB1.5-48</b>

(c)

Gambar 3.2 Spesifikasi MSGA-MSGB *module* 1,5 (a) Gambar Teknik (b) Dimensi (c) Dimensi dan torsi

### 3.1.5 Desain 3D dan Simulasi

Perencanaan desain 3D menggunakan *software* SolidWork 2015 sehingga mempermudah dalam hal redesain sedangkan simulasi akan dibahas pada sub bab 3.2.

### 3.1.6 Analisa Hasil Data dan Kesimpulan

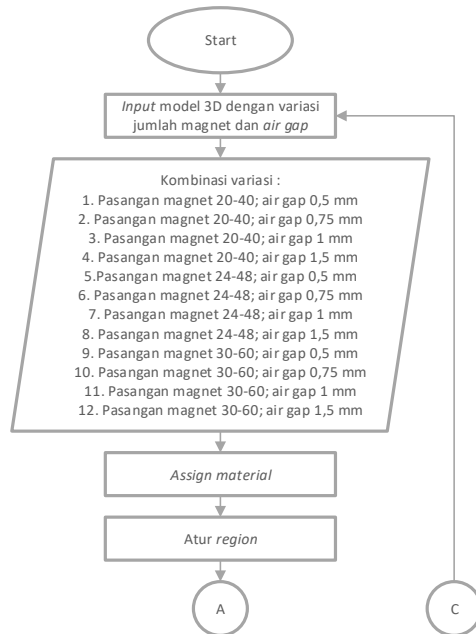
Setelah dilakukan desain dan simulasi akan didapatkan data berupa nilai torsi pada *axial external magnetic spur gear*. Analisa akan dilakukan pada hasil data tersebut serta akan didapatkan beberapa kesimpulan dari penelitian ini.

### 3.1.7 Penulisan Laporan

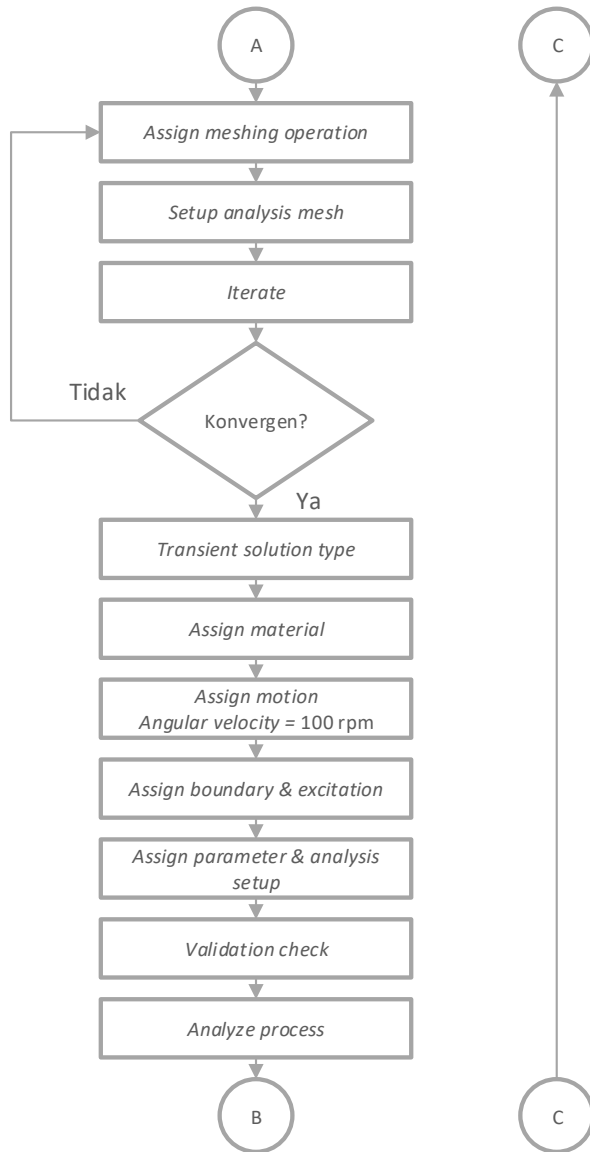
Tahap terakhir dari penelitian ini adalah penulisan laporan. Penulisan laporan ini dilakukan berdasarkan sistematika laporan yang ada.

## 3.2 Pemodelan dan Simulasi

### 3.2.1 Flowchart Simulasi

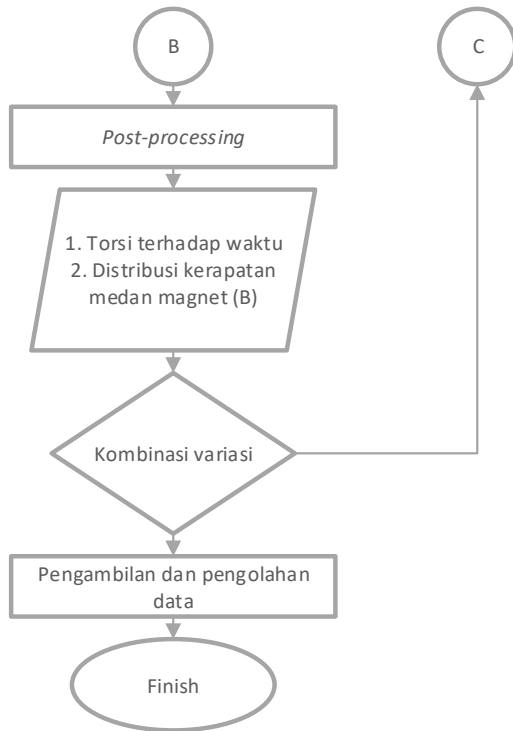


Gambar 3.3 Diagram alir simulasi



Gambar 3.3 Diagram alir simulasi





Gambar 3.3 Diagram alir simulasi

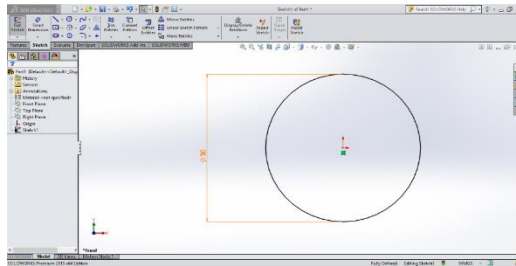
Gambar 3.3 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan simulasi penelitian ini. Simulasi menggunakan *software* Ansys Electronics v17.2.

### 3.2.2 Pemodelan 3D dengan SolidWork

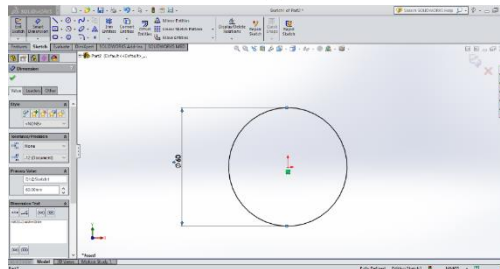
Perancangan model 3D *axial external magnetic spur gear* dilakukan menggunakan *software* SolidWork. Terdapat tiga buah bagian yang dibuat yaitu *high speed* (HS) rotor, *low speed* (LS) rotor, dan magnet permanen. Berikut penjelasan lebih detail dari pemodelan 3D:

- a. Membuat *sketch* yang nantinya akan diproses agar menjadi 3 dimensi. Dilakukan pembuatan *sketch* untuk 3 *part* yaitu HS rotor berbentuk lingkaran, LS rotor berbentuk

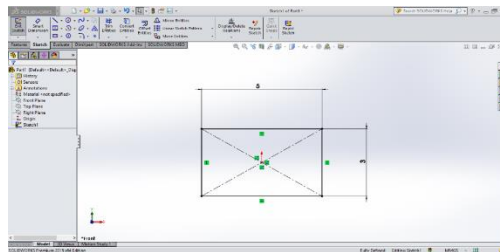
lingkaran, dan magnet permanen berbentuk persegi panjang seperti pada Gambar 3.4.



(a)



(b)

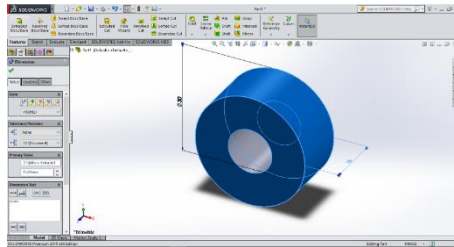


(c)

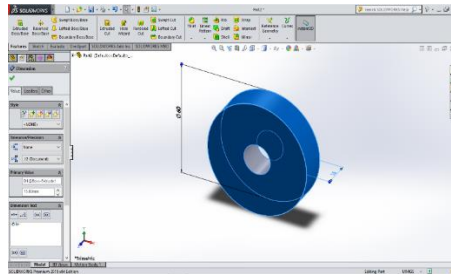
Gambar 3.4 (a) *Sketch* HS rotor (b) *Sketch* LS rotor (c) *Sketch* magnet permanen

- b. *Sketch* yang telah dibuat kemudian diproses dengan *extrude* agar menjadi 3 dimensi. Ketiga *part* tersebut dilakukan *extrude* dengan ukuran yang sama, sehingga HS

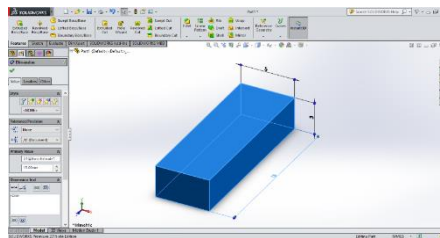
rotor membentuk tabung, LS rotor juga membentuk tabung, dan manget permanen membentuk balok seperti pada Gambar 3.5.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.5 (a) Model 3D HS rotor (b) Model 3D LS rotor (c) Model 3D magnet permanen

### 3.2.3 Simulasi

Setelah pemodelan *axial external magnetic spur gear* telah dibuat dilakukan simulasi menggunakan metode analisis FEM

dengan penyelesaian *magnetostatic* dan analisis *transiaent* pada *software* Ansys Maxwell Electromagnetic v17.2. Tahap magnetostatik meliputi pengaturan *meshing* pada *software* dan tahap *transient* merupakan proses perhitungan *finite element* yang dilakukan *software*. Pemodelan 3D pada tahap sebelumnya dilanjutkan dengan mengatur nilai *mesh* pada metode analisis *magnetostatic* dimana panjang *mesh* tersebut harus konvergen. Lalu dilakukan beberapa pengaturan lainnya pada metode analisis *transients* sebelum dilakukan simulasi analisis 3D *finite element*. Hasil yang diinginkan yaitu kerapatan medan magnet (B) dan torsi yang dihasilkan tiap pasangan gear magnet. Tiap pemodelan dari HS rotor dan LS rotor akan dipasangkan dengan variasi *air gap* dan variasi jumlah magnet permanen yang berbeda pula.

Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisis *magnetostatic* adalah sebagai berikut:

a. *Insert Maxwell 3D Design*

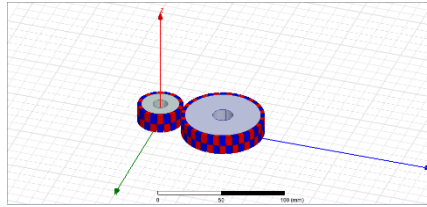
Membuka *software* Ansys Maxwell Electromagnetic v17.2 dan memilih *project* Maxwell 3D Design.

b. *Input Modeler dan Setting Modeller*

*Input* model 3D HS rotor, LS rotor, dan magnet permanen serta dilakukan *assembly* sehingga HS *magnetic gear rotor* dan LS *magnetic gear rotor*. Penyusunan model dilakukan dengan variasi jumlah magnet permanen, variasi jarak celah *air gap* dan variasi ketebalan magnet permanen seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi pemodelan yang digunakan

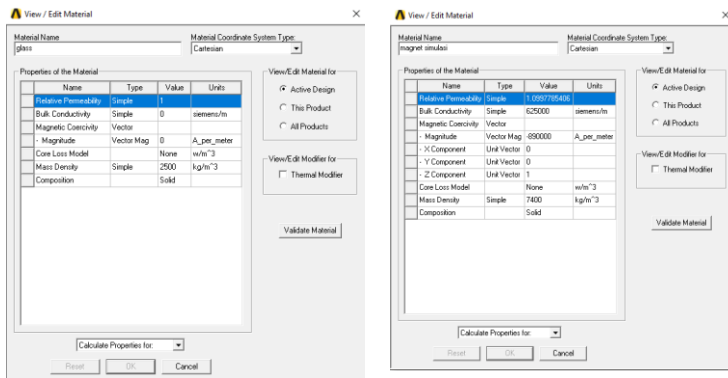
Jumlah pasangan magnet permanen	Jarak air gap
20-40	0,50 mm
24-48	0,75 mm
30-60	1,00 mm
	1,50 mm



Gambar 3.6 Hasil input dan *assembly* 3D model

### c. Assign Material

Setelah memasukkan model ke dalam *project*, dilakukan *assign material* yang berfungsi memberikan material pada model. Material yang digunakan berasal dari *library* Ansys Electromagnetic v17.2. Material HS dan LS rotor adalah *glass*, sedangkan material magnet permanen menggunakan NdFe35. *Properties* untuk tiap material terdapat pada



(a)

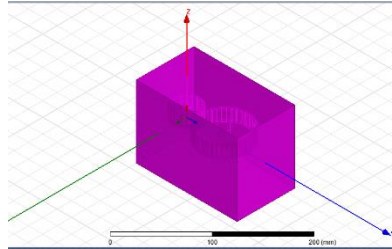
(b)

Gambar 3.7 *Material properties* (a) *Glass* (b) *NdFe35*

### d. Atur Region

*Region* merupakan daerah ruang operasi disekitar *axial external magnetic spur gear* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. *Region* tersebut dibuat dengan cara

membuat model 3D bervolume udara diluar komponen *axial external magnetic spur gear* seperti pada Gambar 3.8.



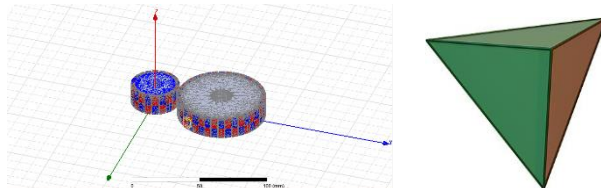
Gambar 3.8 Pembuatan *region*

e. *Assign Boundary & Excitation*

Kemudian pengaturan *Eddy Current Boundaries* pada *excitation*. *Excitation* yang diatur yaitu pada bagian *set eddy effect* ke mode *default*, dimana seluruh komponen magnet dianggap tidak mengalami *eddy effect*. Hal ini berarti komponen magnet tersebut merupakan magnet permanen yang memiliki medan magnet (H) yang secara kontinyu melewati batas *boundary*.

f. *Assign Meshing Operation*

Selanjutnya melakukan pengaturan *mesh* pada setiap komponen model 3D. bentuk *meshing* volume yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe tetrahedra, seperti pada Gambar 3.9. Sedangkan metode *mesh* yang digunakan yaitu *Mesh inside selection, length based*.



Gambar 3.9 Bentuk *meshing*

g. *Setup Analisis Mesh*

Merupakan langkah pengaturan untuk mendapatkan proses iterasi *mesh* yang mencapai konvergen. Dengan menggunakan metode *adaptive passes* pada *software* sebanyak 10 dengan persentase *error* sebesar 1% seperti pada Gambar 3.10.

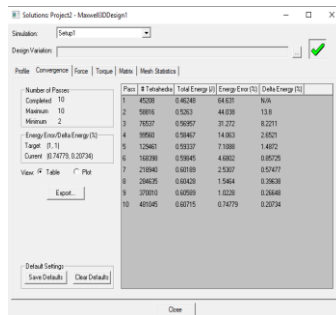


Gambar 3.10 *Setup analisis mesh*

h. *Iterate*

Setelah menetapkan panjang *mesh*, nilai *adaptive passes*, dan persentase *error*, selanjutnya adalah *iterate*. Proses ini merupakan proses perhitungan yang dilakukan *software* untuk mengetahui apakah panjang *mesh* yang ditentukan telah mencapai kriteria konvergen. Jika hasil analisa tidak mencapai konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada *meshing* yang telah dibuat seperti pada Gambar 3.11.

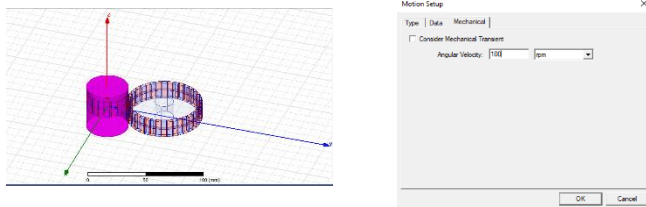
Setelah hasil analisa mencapai konvergen, maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan penyelesaian *transient*. Penyelesaian *transient* diatur melalui *sub menu Solution Type* pada *menu Maxwell 3D*. Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisis *transcient* adalah sebagai berikut:



Gambar 3.11 Hasil analisis *mesh*

#### a. Setting Motion

Selanjutnya menentukan *part* yang dianggap sebagai *driving part* dengan cara memberikan *motion* pada part tersebut. *Driving part* yang ditentukan adalah HS rotor yang diberi *input* putaran sebesar 100 rpm (sesuai dengan pengujian produk KHK Gear MSGA-MSGB) seperti pada Gambar 3.12.



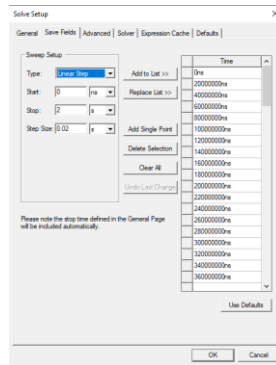
Gambar 3.12 Setting motion

#### b. Assign Parameter dan Analysis Setup

Langkah ini dilakukan untuk menentukan parameter yang akan dihasilkan. Parameter ini merupakan hasil yang diinginkan dan akan ditampilkan oleh *software*. Parameter yang diinginkan adalah torsi. Selanjutnya adalah pengaturan analisis yang dilakukan *software*. Pengaturan ini berfungsi untuk mengatur lama pengambilan data dan *timeframe* pengambilan data. Lama



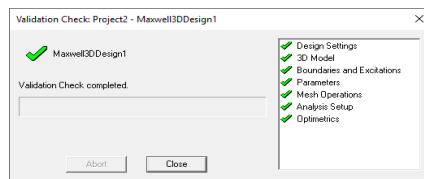
pengambilan data 2 detik dan pengambilan data setiap 0,02 detik seperti pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Setup analisis

#### c. Validation Check

Sebelum dilakukan analisa, terdapat proses validasi apakah model sudah siap untuk dilakukan analisa. Melakukan *validation check* dengan mengklik ikon *validate* pada *toolbar*. Apabila telah memenuhi seluruh kriteria yang ada, maka simulasi dapat dilanjutkan ke tahap analisa seperti pada Gambar 3.14. Hasil analisa akan diambil dari *timeframe* yang telah ditentukan.



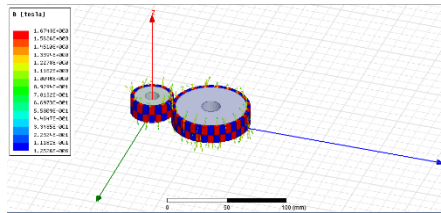
Gambar 3.14 Validation check

#### d. Analyze Process

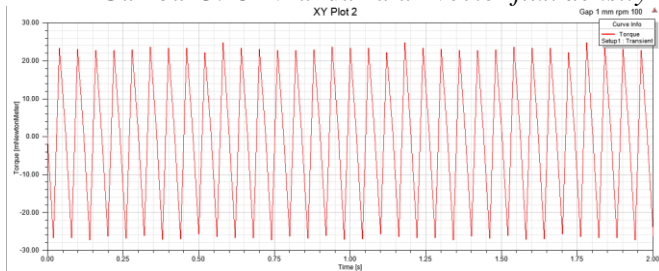
Melakukan proses simulasi dan analisis dengan mengklik ikon *analyze all* pada *toolbar*.

#### 3.2.4 Post-processing

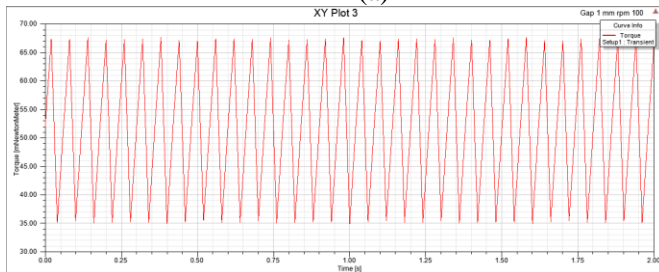
Tahap *post-processing* merupakan tahap pengambilan hasil simulasi. Setelah proses simulasi dan analisis 3D *finite element* selesai, kita akan mendapatkan data mengenai kerapatan medan magnet (B) dan torsi yang dihasilkan *axial external magnetic spur gear* seperti pada Gambar 3.15 dan Gambar 3.16.



Gambar 3.15 Nilai dan arah vector *flux density*



(a)



(b)

Gambar 3.16 (a) Grafik torsi HS rotor terhadap waktu (b) Grafik torsi LS rotor terhadap waktu

### 3.2.5 Pengambilan dan Pengolahan Data

Setelah tahap *post-processing* selesai, didapat data dari simulasi kemudian dikumpulkan semua variasi dan diolah sebelum dilakukan analisa dan pembahasan. Data yang didapat dicatat dalam bentuk tabel seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Lembar data hasil penelitian

Jumlah Magnet Permanen		Air Gap (mm)	Tmax (Nm)	
			HS Rotor	LS Rotor
20	40	0,5		
		0,75		
		1		
		1,5		
24	48	0,5		
		0,75		
		1		
		1,5		
30	60	0,5		
		0,75		
		1		
		1,5		

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

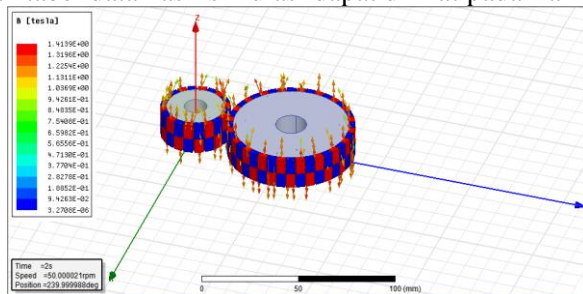
## BAB IV DATA ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab data analisis dan pembahasan akan dijelaskan mengenai data hasil simulasi menggunakan *Ansys Maxwell Electromagnetic* serta analisis dan pembahasan mengenai hasil simulasi dari tiap-tiap variasi.

### 4.1 Analisis Data Simulasi

Pada penelitian tugas akhir kali ini dilakukan simulasi menggunakan *Ansys Maxwell Electromagnetic* untuk mendapatkan data berupa grafik torsi terhadap waktu pada permukaan *axial extrnal magnetic spur gear*. Simulasi dilakukan berdasarkan variasi jumlah magnet dan *air gap*. Variasi jumlah magnet yang digunakan sejumlah 20-40, 24-48, dan 30-60 dengan variasi *air gap* sebesar 0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, dan 1,5 mm.

Hasil dari simulasi pada *Ansys Maxwell Electromagnetic* berupa data torsi dan *flux density* pada *magnetic gear*. Data yang nantinya akan dianalisis adalah torsi sedangkan *flux density* sebagai informasi tambahan terhadap analisis torsi. Untuk mendapatkan informasi besar dan arah dari *flux density* melalui simulasi *magnetostatic* kemudian dilanjutkan dengan simulasi *transient* untuk mendapatkan grafik torsi dari *axial external magnetic spur gear*. Hasil *flux density* dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan tabel data hasil simulasi dapat dilihat pada Lampiran 1.



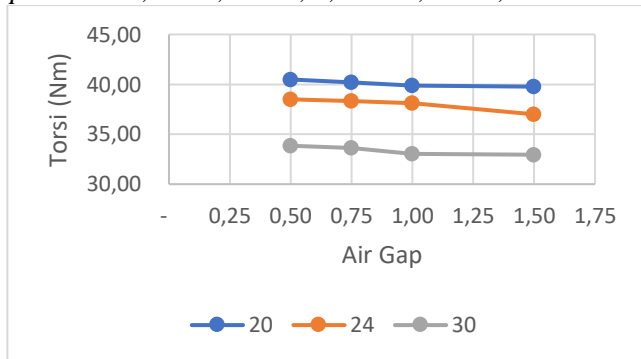
Gambar 4.1 Nilai dan arah *flux density* 3D

#### 4.2 Analisis dan Pembahasan Torsi Hasil Simulasi

Data besar torsi maksimum yang telah didapatkan dari simulasi akan dianalisis pengaruh *air gap* dan jumlah magnet dengan cara membandingkan nilai torsi maksimal yang mampu dihasilkan pada HS rotor dan LS rotor dengan HS rotor dan LS rotor pada setiap variasi. Dari perbandingan tersebut, akan didapatkan variasi jumlah magnet dan celah udara yang dapat menghasilkan torsi maksimum pada *axial external magnetic spur gear*.

##### 4.2.1 Analisis Pengaruh Besar *Air Gap* Terhadap Torsi HS Rotor.

Pada analisis ini, dilakukan perbandingan hasil simulasi pada 3 buah HS rotor berjari-jari 21 mm dengan jumlah magnet permanen yaitu 20, 24, dan 30. Dari tiap HS divariasikan dengan 4 *air gap* sebesar 1,5 mm, 1 mm, 0,75 mm, dan 0,5 mm.



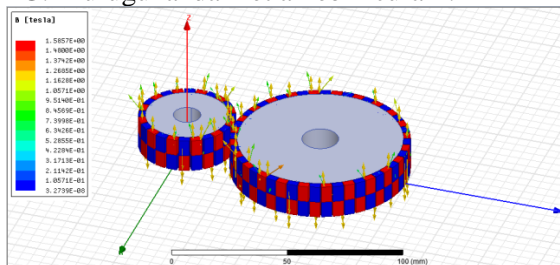
Gambar 4.2 Grafik perbandingan *air gap* vs torsi pada HS rotor

Pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa HS rotor dengan magnet permanen 20 dengan *air gap* 0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, dan 1,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 40,49 Nm, 40,18 Nm, 39,89 Nm, dan 39,77 Nm. HS rotor dengan magnet permanen 24 dengan *air gap* 0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, dan 1,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 38,50 Nm, 38,33 Nm, 38,10 Nm, dan 37,00 Nm. HS rotor dengan magnet permanen 30 dengan *air gap* 0,5 mm,

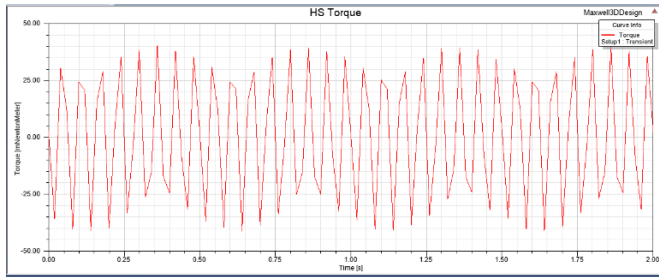
0,75 mm, 1 mm, dan 1,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 33,85 Nm, 33,60 Nm, 33,02 Nm, dan 32,95 Nm.

Dari perbandingan yang telah dilakukan, HS rotor dengan torsi terendah yaitu semua HS rotor dengan *air gap* sebesar 1,5 mm sedangkan torsi terbesar yaitu semua HS dengan *air gap* sebesar 0,5 mm. Hal ini disebabkan oleh HS rotor dengan *air gap* 0,5 mm memiliki nilai *air gap* terkecil dibandingkan variasi *air gap* lainnya. Dengan berkurangnya nilai *air gap* maka dapat meningkatkan *flux density* karena nilai *magnetitation*-nya yang lebih besar. Kenaikan *flux density* berdampak pada kenaikan torsi yang dihasilkan pada HS rotor. Namun, meningkatnya *flux density* menyebabkan torsi yang dihasilkan menjadi lebih fluktuatif. Untuk nilai dari Bx, By, dan Bz pada HS rotor yang paling besar adalah By namun fluktuasi dari By cukup besar sehingga kurang stabil, sedangkan yang paling rendah adalah Bz namun fluktuasi dari nilai Bz lumayan kecil sehingga lebih stabil.

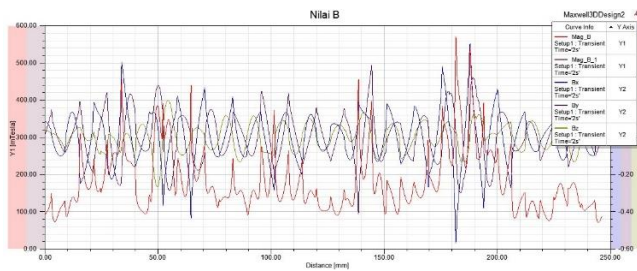
Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, hasil tersebut telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh G. Murugunandam et al pada tahun 2012, yaitu nilai *air gap* berbanding terbalik dengan nilai torsi maksimum yang dihasilkan, dimana semakin kecil nilai *air gap* maka torsi maksimum yang dihasilkan akan semakin meningkat. Namun terdapat perbedaan pada segi *slope* hasil simulasi. Hal ini dikarenakan pada penelitian ini kenaikan variasi *air gap* sebesar 0,25 mm sedangkan pada penelitian G. Murugunandam et al memiliki kenaikan variasi *air gap* sebesar 1 mm. Sehingga menyebabkan *slope* pada hasil penelitian G. Murugunandam et al lebih curam.



(a)

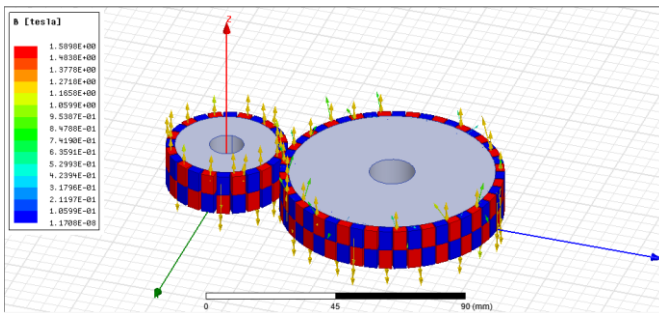


(b)



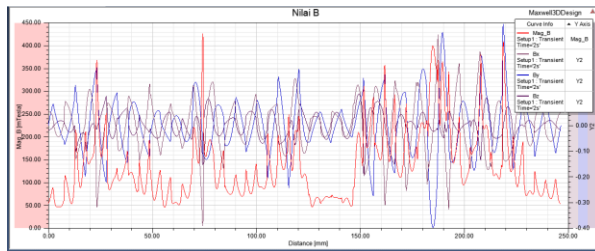
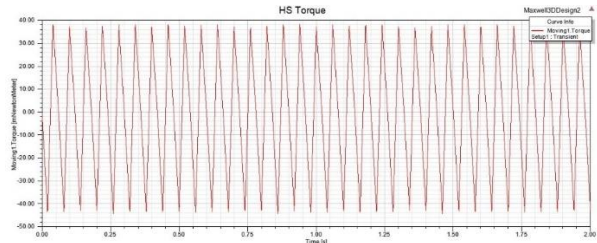
(c)

Gambar 4.3 Hasil simulasi HS rotor dengan magnet permanen 20 dan *air gap* 0,5 mm (a) *Flux density* (b) Torsi (c) Nilai B

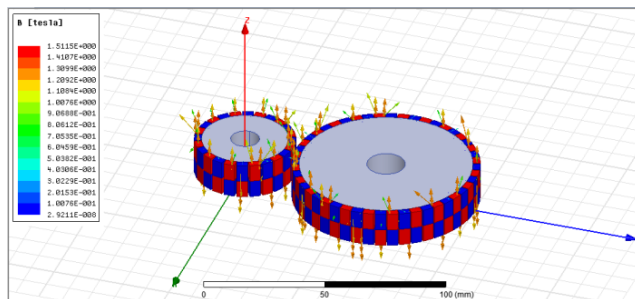


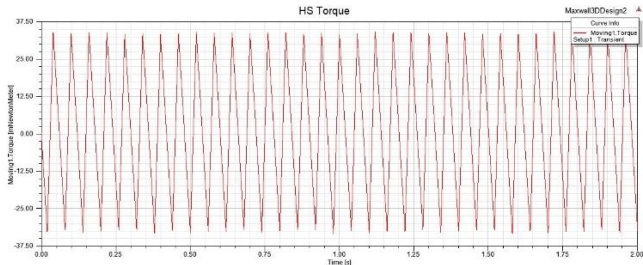
(a)



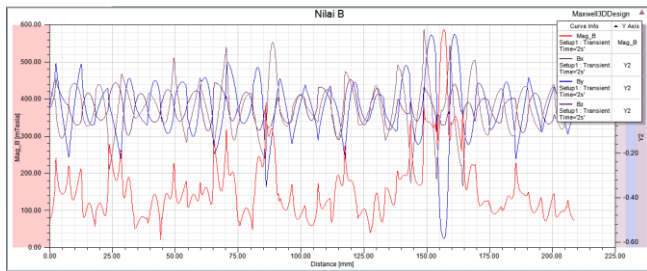


Gambar 4.4 Hasil simulasi HS rotor dengan magnet permanen 24 dan *air gap* 0,5 mm (a) *Flux density* (b) Torsi (c) Nilai B





(b)



(c)

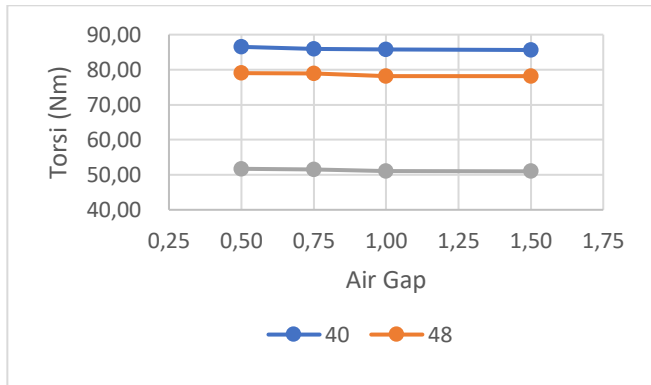
Gambar 4.5 Hasil simulasi HS rotor dengan magnet permanen 30 dan *air gap* 0,5 mm (a). *Flux density* (b). Torsi (c). Nilai B

#### 4.2.2 Analisis Pengaruh Besar *Air Gap* Terhadap Torsi LS Rotor

Pada analisis ini, dilakukan perbandingan hasil pada 3 buah LS rotor dengan jumlah magnet permanen yaitu 40, 48, dan 60. Dari tiap LS rotor berjari-jari 39 mm divariasikan dengan 4 *air gap* sebesar 1,5 mm, 1 mm, 0,75 mm, dan 0,5 mm.

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa LS rotor dengan magnet permanen 40 dengan *air gap* 0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, dan 1,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 86,51 Nm, 85,94 Nm, 85,72 Nm, dan 85,61 Nm. LS rotor dengan magnet permanen 48 dengan *air gap* 0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, dan 1,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 79,01 Nm, 78,89 Nm, 78,22 Nm, dan 78,15 Nm. LS rotor dengan magnet permanen 60 dengan *air gap* 0,5 mm,

0,75 mm, 1 mm, dan 1,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 51,70 Nm, 51,55 Nm, 51,06 Nm, dan 50,98 Nm.

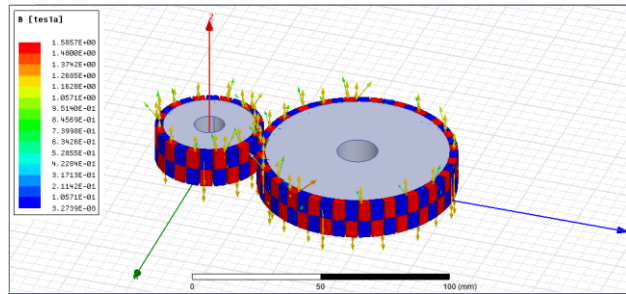


Gambar 4.6 Grafik perbandingan *air gap* vs torsi pada LS rotor

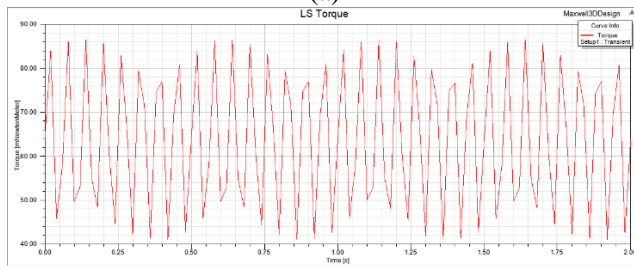
Dari perbandingan yang telah dilakukan, LS rotor dengan torsi terendah yaitu semua jenis LS rotor dengan *air gap* sebesar 1,5 mm sedangkan torsi terbesar yaitu semua jenis LS dengan *air gap* sebesar 0,5 mm. Hal ini disebabkan oleh LS rotor dengan *air gap* 0,5 mm memiliki nilai *air gap* terkecil dibandingkan variasi *air gap* lainnya. Dengan berkurangnya nilai *air gap* maka dapat meningkatkan *flux density* karena nilai *magnetitation*-nya yang lebih besar. Kenaikan *flux density* berdampak pada kenaikan torsi yang dihasilkan pada LS rotor. Namun, meningkatnya *flux density* menyebabkan torsi yang dihasilkan menjadi lebih fluktuatif. Untuk nilai dari Bx, By, dan Bz pada LS rotor yang paling besar adalah By namun fluktuasi dari By cukup besar sehingga kurang stabil, sedangkan yang paling rendah adalah Bz dengan fluktuasi dari Bz lumayan kecil sehingga lebih stabil.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, hasil tersebut telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh G. Murugunandam et al pada tahun 2012, yaitu nilai *air gap* berbanding terbalik dengan nilai torsi maksimum yang dihasilkan, dimana semakin kecil nilai *air gap* maka torsi maksimum yang

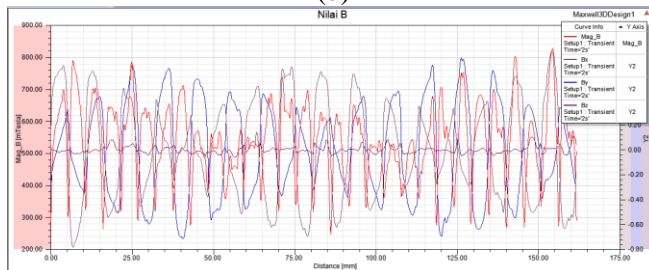
dihasilkan akan semakin meningkat. Namun, terdapat perbedaan pada *slope* hasil simulasi. Hal ini dikarenakan pada penelitian ini kenaikan variasi *air gap* sebesar 0,25 mm sedangkan pada penelitian G. Murugunandam et al memiliki kenaikan variasi *air gap* sebesar 1 mm. Sehingga menyebabkan *slope* pada hasil penelitian G. Murugunandam et al lebih curam.



(a)

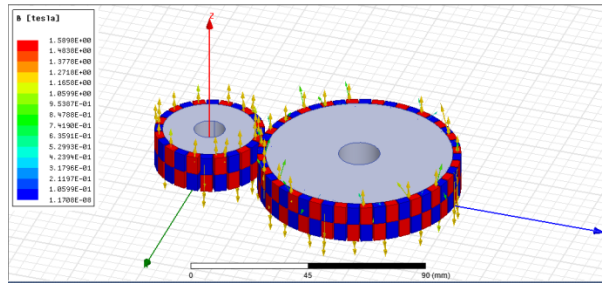


(b)

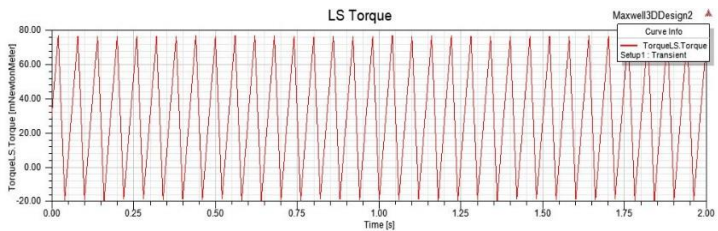


(c)

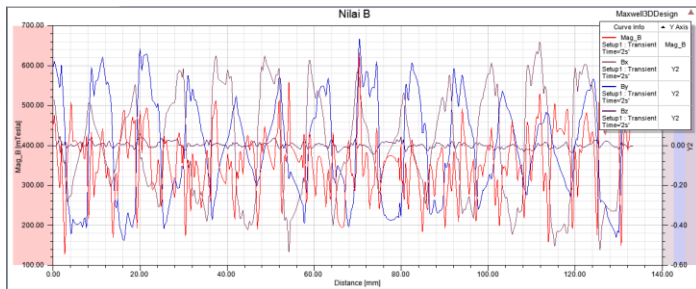
Gambar 4.7 Hasil simulasi LS rotor dengan magnet permanen 40 dan *air gap* 0,5 mm (a) *Flux density* (b) Torsi (c) Nilai B



(a)

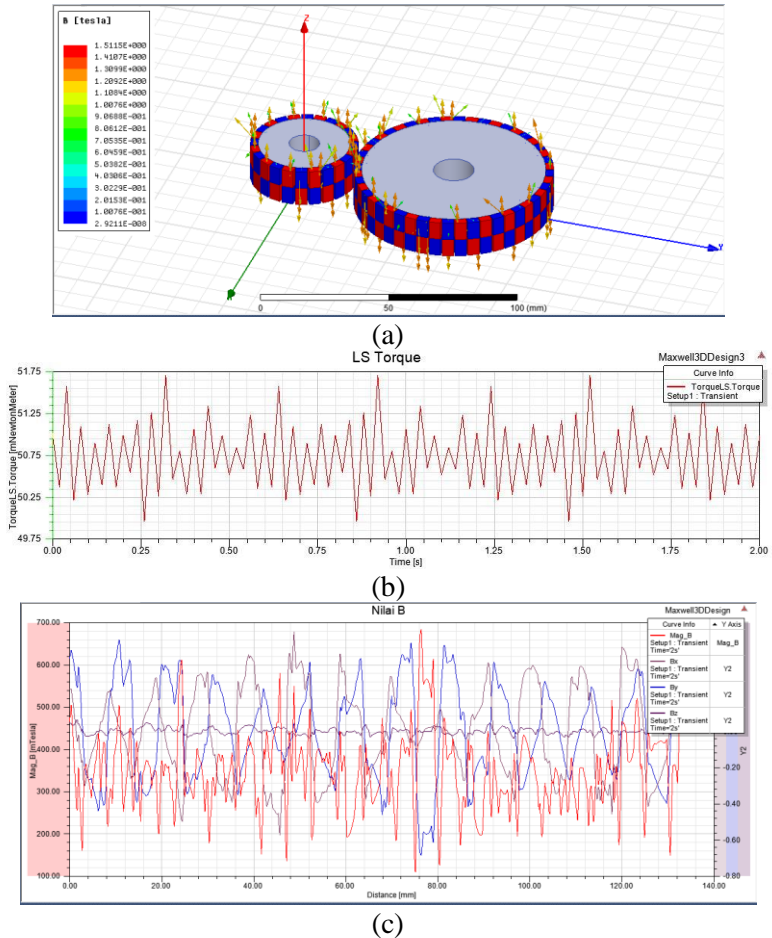


(b)



(c)

Gambar 4.8 Hasil simulasi LS rotor dengan magnet permanen 48 dengan *air gap* 0,5 mm (a) *Flux density* (b) Torsi (c) Nilai B

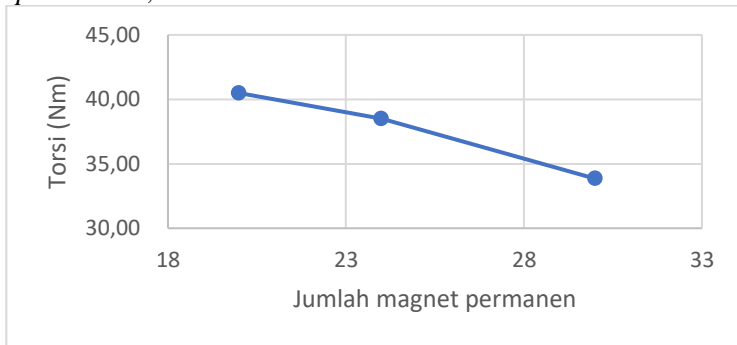


Gambar 4.9 Hasil simulasi LS rotor dengan magnet permanen 60 dengan *air gap* 0,5 mm (a) *Flux density* (b) Torsi (c) Nilai B

#### 4.2.3 Analisis Pengaruh Jumlah Magnet Permanen terhadap Torsi HS Rotor

Pada analisis ini, dilakukan perbandingan hasil pada 3 buah HS rotor dengan jumlah magnet permanen yaitu 20, 24, dan

30. Dari tiap HS rotor berjari-jari 21 mm divariasikan dengan *air gap* sebesar 0,5 mm.



Gambar 4.10 Grafik perbandingan jumlah magnet permanen terhadap torsi pada HS rotor

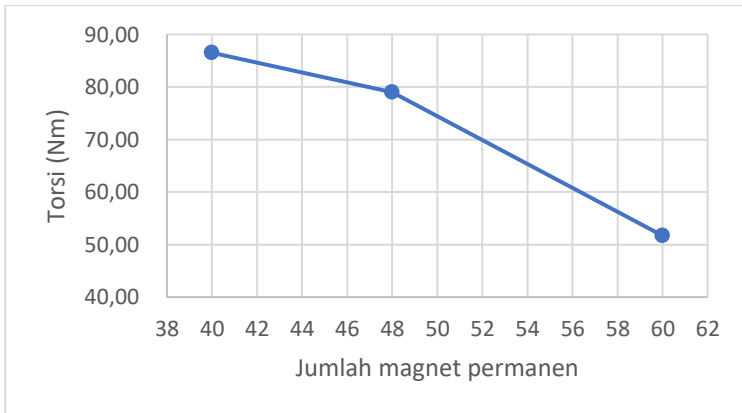
Pada Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa HS rotor dengan magnet permanen 20 dan *air gap* 0,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 40,49 Nm. HS rotor dengan magnet permanen 24 dan *air gap* 0,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 38,50 Nm. HS rotor dengan magnet permanen 30 dengan *air gap* 0,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 33,85 Nm.

Dari perbandingan yang telah dilakukan, HS rotor dengan torsi terendah yaitu HS rotor dengan magnet permanen 30 sebesar 35,09 Nm (hasil simulasi pada Gambar 4.5) sedangkan torsi terbesar yaitu HS rotor dengan magnet permanen 20 sebesar 46,72 Nm (hasil simulasi pada Gambar 4.3). Hal ini disebabkan oleh HS rotor dengan magnet permanen 20 memiliki lebar magnet permanen yang paling besar sedangkan pada HS rotor dengan magnet permanen 30 memiliki lebar magnet permanen paling kecil. Hal tersebut telah sesuai dengan rumus torsi (Persamaan 2.13) yaitu lebar magnet permanen berbanding lurus dengan torsi yang dihasilkan, semakin lebar magnet permanen yang digunakan maka semakin besar pula torsi yang dihasilkan.

#### 4.2.4 Analisis Pengaruh Jumlah Magnet Permanen terhadap

### Torsi LS Rotor

Pada analisis ini, dilakukan perbandingan hasil pada 3 buah LS rotor berjari-jari 39 mm dengan jumlah magnet permanen yaitu 40, 48, dan 60. Dari tiap LS rotor divariasikan dengan *air gap* sebesar 0,5 mm.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan jumlah magnet permanen terhadap torsi pada LS rotor

Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa LS rotor dengan magnet permanen 40 dengan *air gap* 0,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 86,51 Nm. LS rotor dengan magnet permanen 48 dengan *air gap* 0,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 79,01 Nm. LS rotor dengan magnet permanen 60 dengan *air gap* 0,5 mm memiliki torsi maksimal sebesar 51,70 Nm.

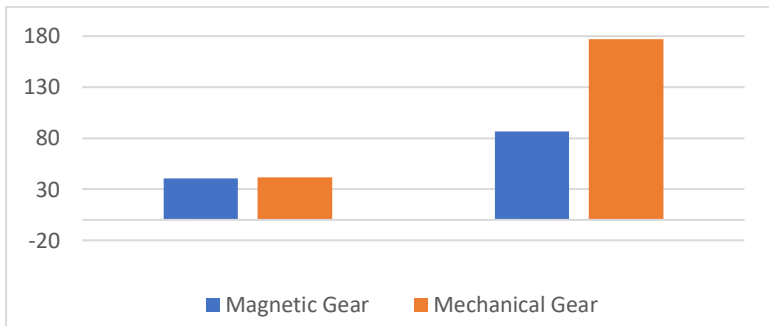
Dari perbandingan yang telah dilakukan, LS rotor dengan torsi terendah yaitu LS rotor dengan 60 magnet permanen sebesar 51,70 Nm (hasil simulasi pada Gambar 4.9) sedangkan torsi terbesar yaitu LS rotor dengan 40 magnet permanen sebesar 86,51 Nm (hasil simulasi pada Gambar 4.7). Hal ini disebabkan oleh LS rotor dengan magnet permanen 40 memiliki lebar magnet permanen yang paling besar sedangkan pada HS rotor dengan magnet permanen 60 memiliki lebar magnet permanen paling kecil. Hal tersebut telah sesuai dengan rumus torsi (Persamaan



2.14) yaitu lebar magnet permanen berbanding lurus dengan torsi yang dihasilkan, semakin lebar magnet permanen yang digunakan maka semakin besar pula torsi yang dihasilkan.

#### 4.2.5 Perbandingan Torsi *Magnetic Gear* dan *Mechanical Gear*

Berdasarkan analisis dan perbandingan dari beberapa variasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil torsi maksimum terbesar HS rotor dengan magnet permanen 20 *air gap* 0,5 mm dan LS rotor dengan magnet permanen 40 *air gap* 0,5 mm. Torsi maksimum dari kedua rotor tersebut selanjutnya akan dibandingkan dengan torsi maksimum pada *mechanical gear* dengan volume yang sama, dimana referensi *mechanical gear* pembanding diambil dari spesifikasi *ground spur gears* produksi dari Kohara Gear Industry Co.,Ltd. dengan kode MSGA1.5-24 dan MSGA1.5-48, *module* sebesar 1,5 (Gambar 3.2).



Gambar 4.12 Perbandingan torsi *mechanical gear* dan *magnetic gear*

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.12, torsi yang dihasilkan oleh *magnetic gear* belum dapat menyamai ataupun melampaui torsi maksimum yang dapat dihasilkan oleh *mechanical gear*. Hal ini dikarenakan rancangan *axial external magnetic spur gear* hanya menghasilkan torsi pada sisi HS dan LS rotor yang magnet permanennya saling berhadapan, sedangkan sisi HS dan LS rotor yang magnet permanennya tidak berhadapan, tidak dapat

menghasilkan torsi. Oleh karena itu, torsi maksimum yang dapat dihasilkan oleh rancangan *axial external magnetic spur gear* tidak sebesar ataupun lebih besar dari torsi maksimum yang dapat dihasilkan oleh *mechanical gear*.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Seiring dengan bertambahnya jumlah magnet permanen yang digunakan maka torsi maksimum yang dapat disalurkan *axial external magnetic spur gear* semakin kecil. Hal ini dikarenakan *magnetitation* yang lebih besar terjadi pada luas penampang magnet permanen yang lebih besar. Dengan meningkatnya nilai *magnetitation* akan meningkatkan torsi maksimum *magnetic gear*.
2. Seiring dengan bertambahnya jarak *air gap* maka torsi maksimum yang dapat disalurkan *axial external magnetic spur gear* semakin kecil. Hal ini dikarenakan gaya magnet pada masing-masing rotor akan semakin besar apabila jaraknya semakin dekat.
3. Torsi dari HS rotor *magnetic spur gear* jenis *axial external magnetic spur gear* hampir menyamai torsi pada *ground spur gear* MSGA1.5-24 dengan dimensi yang sama namun belum dapat melampauinya. Torsi HS rotor dengan magnet permanen 20 lebih kecil 2,43% dari torsi *ground spur gear* MSGA1.5-24.
4. Torsi dari LS rotor *magnetic spur gear* jenis *axial external magnetic spur gear* belum dapat menyamai torsi pada *ground spur gear* MSGA1.5-24 dengan dimensi yang sama. Torsi LS rotor dengan magnet permanen 40 lebih kecil 51,12% dari torsi *ground spur gear* MSGA1.5-48.
5. Torsi maksimum *magnetic gear* dapat ditingkatkan dengan cara memperkecil jarak *air gap* dan memperlebar magnet permanen yang digunakan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan terdapat beberapa saran yang dapat disampaikan guna pengembangan pada penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Perlu dibuat *prototype* agar memudahkan dalam pembuktian teori maupun hasil simulasi dengan pengaplikasiannya.
2. Pengoptimalan torsi maksimum yang dapat dihasilkan dengan cara melakukan perubahan seperti geometri, jenis magnet permanen, penyusunan magnet, dsb.
3. Untuk simulasi *transient* sebaiknya menggunakan komputer dengan spesifikasi mumpuni.

## DAFTAR PUSTAKA

- Deutschman, A., Michels, W., & Wilson, W. (1975). *Machine Design: Theory and Practice*. New York: Macmillan.
- Fisika Zone. (n.d.). *Medan Magnet*. Retrieved March 30, 2018, from <http://fisikazone.com/medan-magnet/>
- Hamidizadeh, S. (2016). *Study of Magnetic Properties and Demagnetization Models of Pemanent Magnets for Electric Vehicle Application*. Canada: Department of Mining and Materials Engineering, McGill University.
- Jørgensen, F. T. (2010). *Design and Contruction of Permanent Magnetic Gears*. Department of Energy Technology, Aalborg University.
- Kohaka Gear Industry Co., Ltd. (2015). *Product Guides & Technical Data* (Vol. 2).
- Mulyadi, R. (2011). Penyusunan Program Excell untuk Perancangan Rodagigi Lurus dan Rodagigi Miring Berdasarkan Metode Nieman.
- Muruganandam, G., Padma, D. S., & Selvakumar, P. (2012). Torque Analysis of Magnetic Spur Gear with Different Configurations. *International Journal of Electrical Engineering, Volume 5*.
- Raj, Y., Varghese, L., Nair, V., & Vincent, M. (2016, May). Magnetic Gearing System. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology, volume 2*(Issue 12).
- Singh, A., Gite, M., & Narkhede, A. (2014). An Overview of Neodymium Magnets over Normal Magnets for the Generation of Energy. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, volume 2*(Issue 12).
- Tlali, P., Wang, R.-J., & Gerber, S. (2014). Magnetic Gear Technologies: A Review. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- Wu, Y.-C., & Wang, C.-W. (2015). Transmitted Torque Analysis

of a Magnetic Gear Mechanism with Rectangular  
Magnets. *Applied Mathematics & Information Sciences*.

## LAMPIRAN 1

Berikut merupakan tabel data torsi maksimum hasil simulasi *transient* pada *Ansys Maxwell Electromagnetic*.

Jumlah Magnet Permanen		Air Gap (mm)	Tmax (Nm)	
			HS Rotor	LS Rotor
20	40	0,50	40,49	86,51
		0,75	40,18	85,94
		1,00	39,89	85,72
		1,50	39,77	85,61
24	48	0,50	38,50	79,01
		0,75	38,33	78,89
		1,00	38,10	78,22
		1,50	37,00	78,15
30	60	0,50	33,85	51,70
		0,75	33,60	51,55
		1,00	33,02	51,06
		1,50	32,95	50,98

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**



## BIODATA PENULIS



Akbar Robbi Cahyana dilahirkan di Jember, 10 September 1994 merupakan anak yang terlahir dari orangtua bernama Gatot Endra Supriyadi dan Dewi Saptorini. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Sumbersari IV, Sumbersari Jember pada kelas I-VI (2001-2007). Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN 3 Jember pada tahun 2007-2010, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 1 Jember pada tahun 2010-2013. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi Staff Divisi Roda 2 di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS pada periode 2014-2015. Selanjutnya menjadi Kabiرو Pengabdian Masyarakat Divisi Roda 2 di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS pada periode 2015-2016. Penulis juga menjadi Ketua Pelaksana event Kursus Dasar-Dasar Otomotif 2014 dan salah satu pemateri “Sistem Pemasukan Bahan Bakar” dalam event Kursus Dasar-Dasar Otomotif 2015. Selain aktif berorganisasi, penulis juga aktif magang ke perusahaan seperti PT Dirgantara Indonesia. Penulis juga aktif dalam kegiatan non-akademik khususnya olahraga bola basket.

Selama hidup penulis berpegang teguh pada prinsip “*perfect practice make us more perfect*” yang selalu menjadikan penulis selalu introspeksi, mawas diri dan berusaha peka untuk memberikan yang terbaik pada setiap hal. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email [robbi.cahyana@gmail.com](mailto:robbi.cahyana@gmail.com).